

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra Automatizace počítačové techniky v metalurgii

## Diplomová práce

**Téma:**

**Hodnocení životnosti technických systémů**

**Rating life of technical systems**

**Rok: 2012**

**Petr Kovalčík**

# **Zásady pro vypracování diplomové práce**

## **I.**

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## **II.**

### Uspořádání diplomové práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 5. Obsah DP                  |
| 2. Zásady pro vypracování DP                 | 6. Textová část DP           |
| 3. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy                   |

ad 1) Titulním listem je originál zadání DP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za titulním listem.

ad 3) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah DP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 8).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 7) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 8) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

### IV.

Diplomová práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2011/2012.

Ostrava 15. 11. 2011

*Prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.*  
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Davidovi, Ph.D. za cenné rady a ochotný přístup. Dále pak děkuji svému konzultantovi panu prof. Ing. Milanu Vrožinovi, CSc. a v neposlední řadě také své rodině za podporu.

## **Abstrakt**

Cílem této diplomové práce je zjistit životnost technických objektů, zejména krystalizátorů. V úvodu práce je popis životnosti technických objektů následovaný vysvětlením norem a především normy ČSN EN 61649:2008 Weibullova analýza. Dále je podrobněji uvedena technická charakteristika krystalizátorů. Pro lepší orientaci je popsán systém měření krystalizátoru MKL 100/420 od firmy Dasfos v.o.s. Praktickou část tvoří samotný průběh měření a jeho realizace.

## **Klíčová slova**

Weibullova analýza, Krystalizátor, Životnost technických objektů, Model

## **Abstract**

The aim of this thesis is to determine the durability of technical objects, in particular molds. Technical description of the life of the object is located in the introduction and is followed by an explanation of standards and most Standard EN 61649:2008 Weibull analysis. Technical characteristics of the molds are described in more details below. There is a description of measurement crystallizer MKL 100/420 from the company Dasfos wasps for better orientation. The practical part consists of measuring progress and its implementation.

## **Keywords**

Weibull analysis, Mold, Lifetime of technical objels, Model

## Seznam zkratek a značek

### Zkratky

<b>ASTM</b>	- <b>A</b> merican <b>S</b> ociety for <b>T</b> esting of <b>M</b> aterials – Asociace pro zkoušení materiálů v USA
<b>CDF</b>	- <b>C</b> umulative <b>D</b> istribution <b>F</b> unction – Kumulativní distribuční funkce
<b>CENELEC</b>	- <b>E</b> uropean <b>C</b> ommittee for <b>E</b> lectrotechnical <b>S</b> tandardization – Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice
<b>ČSN</b>	- <b>Č</b> eskoslovenská <b>S</b> polečnost pro <b>N</b> ormalizaci (nyní <b>ČNI</b> )
<b>ČNI</b>	- <b>Č</b> eský <b>N</b> ormalizační <b>I</b> nstitut
<b>DIN</b>	- <b>D</b> eutsches <b>I</b> nstitut für <b>N</b> ormung – Německý institut pro normalizaci
<b>EN</b>	- <b>E</b> vropská <b>N</b> orma
<b>ISO</b>	- <b>I</b> nternational <b>S</b> tandards <b>O</b> rganisation – Mezinárodní organizace pro normalizaci
<b>MLE</b>	- <b>M</b> aximum <b>L</b> ikelihood <b>E</b> stimation – Odhad metodou maximální věrohodnosti
<b>MRR</b>	- <b>M</b> edian <b>R</b> ank <b>R</b> egression – Regrese prostřední hodnoty
<b>MTTF</b>	- <b>M</b> ean <b>T</b> ime to <b>F</b> ailure – Střední doba do poruchy
<b>PDF</b>	- <b>P</b> robability <b>D</b> ensity <b>F</b> unction – Funkce hustoty pravděpodobnosti
<b>PLP</b>	- <b>P</b> lynulé <b>L</b> ití <b>P</b> ředlitků
<b>RSS</b>	- <b>R</b> eliability <b>S</b> tress <b>S</b> creening – Zlepšení bezporuchovosti
<b>STATISTICA</b>	- Softwarový program pro statistickou analýzu dat
<b>VIS</b>	- <b>V</b> ýrobní <b>I</b> nformační <b>S</b> ystém
<b>ZPO</b>	- <b>Z</b> ařízení <b>P</b> lynulého <b>O</b> dlévání

## **Značky**

<b>e</b>	- exponenciální funkce
<b>f (t)</b>	– hustota pravděpodobnosti
<b>F (t)</b>	– kumulativní distribuční funkce
<b>h (t)</b>	– hazardní funkce
<b>H (t)</b>	– kumulativní hazardní funkce
<b>F<sub>1</sub></b>	– počet poruch se způsobem poruchy 1
<b>n</b>	– Weibullova charakteristická doba života (Weibullův parametr měřítka)
<b>R<sup>2</sup></b>	- koeficient lineární regrese
<b>t</b>	– doba (proměnná)
<b>t<sub>0</sub></b>	– počátek rozdělení, doba bez poruchy
<b>β</b>	– Weibullův parametr tvaru
<b>λ (t)</b>	– okamžitá intenzita poruch

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Životnost technických objektů .....</b>	<b>3</b>
2.1	Životnost krystalizátorů .....	6
<b>3</b>	<b>Využití Weibullova rozdělení při hodnocení životnosti technického objektu ..</b>	<b>7</b>
3.1	Normy .....	7
3.2	ČSN IEC 61649 Weibullova Analýza .....	8
3.2.1	Dvouparametrické Weibullovo rozdělení.....	8
3.2.2	Tříparametrické Weibullovo rozdělení.....	11
3.2.3	Parametr tvaru .....	12
3.3	Analýza dat.....	13
<b>4</b>	<b>Model hodnocení životnosti technického systému.....</b>	<b>15</b>
4.1	Druhy profilů .....	16
4.2	Popis odlévání.....	17
4.3	Základní typy ZPO.....	19
4.4	Moderní trendy a problémy výzkumu za provozu.....	20
<b>5</b>	<b>Systém měření MKL 100/420 .....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Hodnocení modelování životnosti krystalizátoru .....</b>	<b>26</b>
6.1	Analytický model.....	26
6.2	Model s využitím umělých neuronových sítí.....	29
6.2.1	Postup tvorby modelu.....	29
6.2.2	Výsledky učení modelu .....	32
6.2.3	Zhodnocení modelu.....	46
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>Literatura a web odkazy .....</b>	<b>48</b>



# 1 Úvod

Hlavním cílem této diplomové práce je hodnocení životnosti technických objektů, konkrétně krystalizátorů. Životnost je jednou ze základních vlastností objektu, která označuje, jak dlouho by měl objekt plnit požadovanou funkci do dosažení mezního stavu při předepsaném systému údržby a oprav. V rámci řešení bude využito normy ČSN EN 61649:2008 Weibullova analýza pro vytvoření analytického modelu hodnocení životnosti technického objektu.

Krystalizátory jsou speciálním zařízením, které odvádí nadbytečné teplo z tekuté oceli a nutí ji k tuhnutí v daném profilu, tvaru tohoto zařízení. V krystalizátoru se ochladí povrchová vrstva oceli, čímž vznikne tuhý obal s tekutým jádrem, který následně zásobuje výstup z krystalizátoru. Tento proces je spojen s mnoha nežádoucími účinky, jako je například opotřebení stěn krystalizátoru. Stav vnitřních stěn tohoto zařízení je velmi důležitá veličina, která musí být pečlivě sledována. Příliš velké opotřebení stěn krystalizátoru vede k nedostatečnému odvodu nadbytečného tepla a je náchylná k výskytu nebo nežádoucím trhlinám vzniklých tepelným napětím na povrchové vrstvě. Technická diagnostika povrchu krystalizátoru je časově velmi náročný proces, který vyžaduje odstavení krystalizátoru a jeho demontáž.

Analytický přístup při tvorbě modelu životnosti bude doplněn experimentálními daty, které by vytvářený model měly zpřesnit a adaptovat na reálné provozní podmínky. Pro získání potřebných experimentálních dat bude využito výsledků měření krystalizátorů měřicím systémem od firmy DASFOS v.o.s.. Tato firma působí v různých odvětvích průmyslu v oblasti výzkumu a vývoje speciálních měřicích monitorovacích a testovacích laboratorních systémů již dvacet let. Konkrétně budou využity experimentální data ze systému MKL 100/420 pro měření rozměrů, evidenci a hodnocení opotřebení kruhových a čtvercových krystalizátorů zařízení plynulého odlévání. Tato měření byla prováděna ve firmě Třinecké železářny a.s.

Dalším cílem diplomové práce je vytvoření modelu umožňující modelování profilu krystalizátoru pomocí neuronových sítí. Výsledkem řešení by měla být modelace krystalizátoru, respektive možnost vykreslení opotřebení po celé délce krystalizátoru pomocí neuronové sítě v programu STATISTICA. Díky provedeným měřením a následným modelacím se očekává snadnější predikce životnosti krystalizátoru a s tím spojená jeho dlouhodobější využitelnost s nižšími náklady. Takto vytvořené modely by měly být základem metodiky pro další typy krystalizátorů.

## 2 Životnost technických objektů

Jednou ze základních vlastností předmětu je životnost, která označuje, jak dlouho by měl mít předmět své základní parametry, nebo téměř základní vlastnosti. Zde nepatří vlastní provozuschopnost např. také spolehlivost a výkonnostní charakteristiky.

Životnost je vlastnost objektu, která je vyjádřena jeho schopností vykonávat požadované funkce do dosažení mezního stavu při stanoveném systému předepsané údržby a oprav. Podle platných norem je pojem mezní stav definován jako stav objektu, ve kterém musí být další využití objektu přerušeno.

### Důvody přerušení:

- neodstranitelné porušení bezpečnostních požadavků;
- neodstranitelné snížení efektivnosti provozu pod přípustnou hodnotu;
- neodstranitelné překročení předepsaných mezí stanovených parametrů;
- nutnost provedení generální opravy.

Životnost se převážně měří na čas, nebo na následná opakování. Časově se měří například elektrospotřebiče, kde může mít domácí spotřebič životnost 5 let. Z této informace víme, že pokud si takovýto spotřebič koupíme, měla by jeho provozuschopnost být bez větších změn přibližně 5 let. Na následná opakování se dají měřit například dobíjecí baterie, kde výrobce specifikuje, kolikanásobně se baterie můžou nabít, aby si zachovaly své vlastnosti. Délku životnosti objektu ovlivňuje při výrobě např. (plánované zastarávání, výrobní technologie a jiné atributy výrobce jako jsou např. jakost, systém kontroly, úroveň výrobních prostředků a stupeň kvalifikace zaměstnanců). Významně ovlivňuje životnost způsob, jakým je produkt používán (výrobní zatěžování, okolní prostředí apod.). U sledovaných zařízení se proto pravidelně monitoruje zatěžování (např. v jaderné energetice) a také se sleduje stav předpokládané životnosti, aby se mohla včas naplánovat výměna.

Řízením životnosti technických systémů nazýváme proces. Jeho řízení, u kterého se stanoví doba neboli hodnota diagnostického signálu, po kterou je schopno zařízení neboli jeho části plnit požadovanou funkci v daných podmínkách užívání a údržby do momentu dosažení mezního stavu. V různých etapách životního cyklu objektu se mění i význam číselných ukazatelů životnosti a především pak technického života objektu. Proto rozlišujeme několik termínů.

#### Životnost technických objektů dělíme do několika oblastí:

- technická;
- projektovaná;
- únavová;
- výpočtová;
- celková;
- zbytková.

#### Technická životnost

Technická životnost je v podstatě doba od vzniku výrobku do jeho zchátrání a technického zániku za předpokladu běžné údržby. Účelem a cílem těchto technických specifikací je především dosáhnout takového materiálového a technického zabezpečení, aby byl následný výrobek zajištěn s minimálními ekonomickými náklady při maximální kvalitě.

#### Projektovaná životnost

Tato doba je určena projektantem, který dané zařízení navrhl a po tuto dobu má být zařízení schopno plnit spolehlivě a bezpečně svou funkci. Do tohoto údobí se aplikují i veškerá ekonomická hodnocení a většinou i povolovací řízení. Projektovaný technický život objektu je většinou kratší než výpočtový technický život objektu.

#### Únavová životnost

Z hlediska únavy lze definovat tuto životnost jako počet použitých opakování stresových cyklů, který je materiál schopný vydržet před selháním.

### Výpočtová životnost

Tento termín označuje minimální období, po které musí být zařízení schopno plnit spolehlivě a bezpečně svou funkci za předem stanovených podmínek. Tento časový úsek je exaktně stanoven výpočtovými metodami

### Celková životnost

Označuje maximální možnou dobu provozu objektu. Ta je ukončena konečným vyřazením, které je podmíněno mezním stavem.

### Zbytková životnost

Je to čas, kdy může být objekt ještě stále využíván s požadovanou spolehlivostí. Je to zbývající čas pro dosažení celkového technického života zařízení.[10]

V následujícím obrázku 1 jsou znázorněna časová linie technické životnosti objektu.



Obr. 1 Časová linie technické životnosti objektu

## 2.1 Životnost krystalizátorů

Obečně se počítá životnost krystalizátorů na metráž odlité oceli, odlitou hmotnost oceli nebo počet odlitých taveb. Řádově se u odlitých taveb uvádí 500 – 2500 taveb. Takto široké rozmezí je zapříčiněno rozdílnými vlastnostmi ocelí a odlišnými tvary odlitků, které je možno odlévat. U normálního chodu dosahuje životnost 10 000 až 15 000 odlitých bram. Výměna deskového krystalizátoru je nutná i v případě, že mezi spoji krystalizátoru jsou větší mezery než 0,3 mm anebo také podle stavu povrchu stěn. Technický stav krystalizátorů přímo ovlivňuje množství a typ povrchových vad předlitků.

Mezi hlavní vlivy na životnost krystalizátoru patří:

- u malých průřezů krystalizátoru dochází díky vyšším licím rychlostem k rychlejšímu opotřebení;
- zakřivené krystalizátory dosahují kratší životnosti z důvodu excentrického dopadu licího proudu do krystalizátoru a zvětšeným mechanickým otěrem ve spodní části krystalizátoru;
- vlastnosti a jakost materiálu krystalizátoru;
- tvar a velikost plynule litého předlitku (PLP). Význam mají zvláště u výpočtu odlité hmotnosti ocele;
- způsob chlazení. Ten je ale dán technologickými parametry. Jeho řízení je ovlivněno technologickou efektivností procesu odlévání a ne opotřebením krystalizátoru;
- rychlost lití;
- vlastnosti používaného licího prášku;
- další provozní vlivy (propaly, argónování, odlévací teplota, a další).

### 3 Využití Weibullova rozdělení při hodnocení životnosti technického objektu

#### 3.1 Normy

Obecně normy jsou definovány jako pravidlo neboli směrnice, jejíž zachování je zavazující. Normy máme např. právní, mravní a technické. Technické normy nám přesně vymezují, jaké požadované vlastnosti, tvar, samotnou realizaci nebo uspořádání opakujících se předmětů i způsobů a postupů práce, ale také charakteristiku všeobecně užívaných technických pojmů máme zachovat pro jejich splnění.

U technických norem je jejich dělení následující:

- systém ČSN (pro materiály, které jsou vyrobeny v ČR);
- systém ISO (mezinárodní);
- systém značení EN:
  - označení materiálovým číslem;
  - označení podle použití, popř. podle chemického složení.

Význam norem:

- ochrana spotřebitele;
- je to komunikativní funkce mezi výrobcem a zákazníkem, ale také i mezi výrobcí v národním a mezinárodním měřítku;
- zavedení symbolů a kódů pro zkvalitnění nejen mezinárodního obchodního styku a tím překonat jazykovou bariéru;
- ekonomické zlepšení.

## 3.2 ČSN IEC 61649 Weibullova Analýza

Tato norma je českou verzí evropské normy **EN 61649:2008**. Datem 1. 10. 2011 nahradila normu ČSN IEC 61649 (01 0653) z dubna 1999, která platila souběžně s touto normou do uvedeného data. Aktuálně má tato norma druhé vydání, které ruší původní verzi vydanou v roce 1997 a je jeho technickou verzí.

Tato evropská norma byla schválena CENELEC 1. 10. 2008. Originální verze je vyhotovena ve třech jazykových verzích (anglické, německé, francouzské). Pokud byla tato norma přeložena členem CENELEC do jeho vlastního jazyka, za kterou nese odpovědnost, má stejný status jako verze oficiální.

Weibullovo rozdělení se používá k modelování dat bez ohledu na to, zda je intenzita poruch stoupající, klesající či konstantní. Weibullovo rozdělení je pružné a přizpůsobivé pro data v širokém rozsahu. U všech objektů je třeba zaznamenávat dobu poruchy, cykly do poruchy, přepravní vzdálenost, mechanické namáhání nebo obdobné spojité parametry. Rozdělení doby života může být modelováno dokonce i tehdy, jestliže všechny objekty neměly poruchu.

V normě je uveden návod, jak provádět analýzu s použitím programu tabulkového procesoru. Je v ní též uveden návod, jak samostatně analyzovat různé způsoby poruch a jak identifikovat základní soubor možných slabých objektů. S použitím tří-parametrického Weibullova rozdělení lze získat informace o době do první poruchy nebo o minimu výdrže (dlouhodobé odolnosti) ve výběru. [1]

### 3.2.1 Dvoupametrické Weibullovo rozdělení

Je to nejpoužívanější rozdělení pro analýzu dat o době života. Weibullova hustota pravděpodobnosti je prezentována rovnicí:

$$f(t) = \beta \times \frac{t^{\beta-1}}{n^{\beta}} \times e^{-\left(\frac{t}{n}\right)^{\beta}} \quad [1] \tag{1}$$

kde	f(t)	je	hustota pravděpodobnosti;
	t	-	proměnná doba;
	n	-	charakteristická doba života tzv. parametr měřítka;
	$\beta$	-	parametr tvaru;
	e	-	exponenciální funkce.

Weibullova kumulativní distribuční funkce je vyjádřena explicitní rovnicí, jak je uvedeno v rovnici:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{n}\right)^\beta} \quad [1] \quad (2)$$

kde	F (t)	je	kumulativní distribuční funkce;
	$\beta$	-	rychlost změny okamžité intenzity poruch s časem;
	t	-	proměnná doba;
	n	-	charakteristická doba života tzv. parametr měřítka;
	e	-	exponenciální funkce.

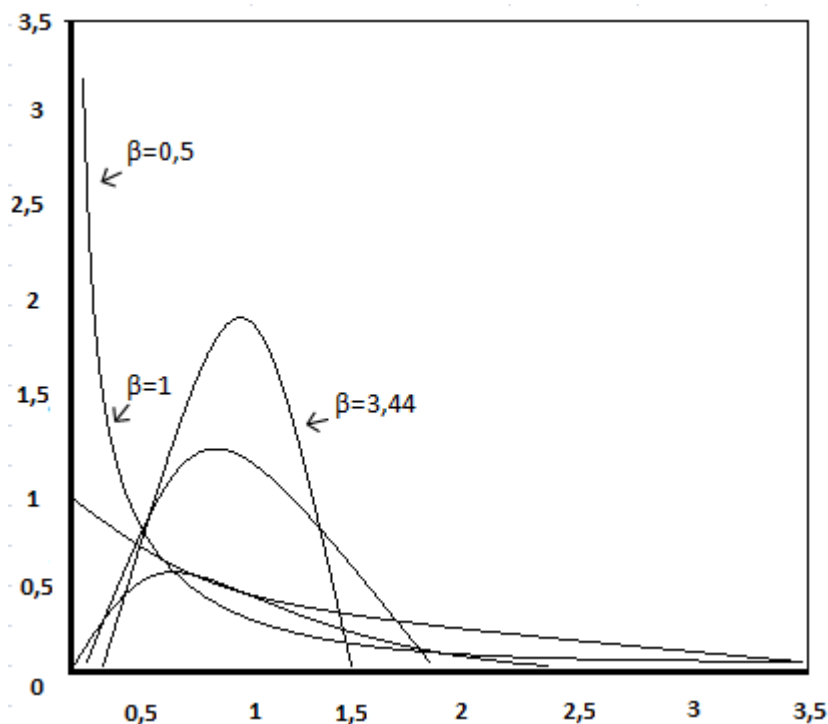
Příklady použití jsou:

- období časných poruch;
- období náhodných poruch;
- období poruch opotřebením.

Parametr tvaru  $\beta$  určuje nejvhodnějšího člena Weibullové skupiny rozdělení. Velká rozdílnost různých členů je patrná u hodnoty funkce hustoty pravděpodobnosti (viz obrázek 2). Weibullovo rozdělení se liší od ostatních rozdělení tím, že mu vyhovují data o době života v širokém rozsahu.

Parametr  $t$  je generický, tedy obecný a může znázorňovat různé ukazatele, jakými jsou například vzdálenost, doba, počet cyklů nebo aplikace mechanického namáhání.





Obr. 2 Tvary funkce hustoty pravděpodobnosti Weibullovsky skupiny pro  $n = 1$

Na obrázku 2 je zachycen tvar funkce hustoty pravděpodobnosti pro  $\beta=3,44$ , který připomíná normální rozdělení. To je dobrá aproximace, kromě koncových částí rozdělení.

Okamžitá intenzita poruch  $\lambda(t)$ , (nebo hazardní funkce  $h(t)$ ) dvouparametrického Weibullova rozdělení je uvedena v této rovnici:

$$\lambda(t) = h(t) = \beta \times \frac{t^{\beta-1}}{n^{\beta}} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (3)$$

kde  $\lambda(t)$  je okamžitá intenzita poruch;  
 $h(t)$  - hazardní funkce;  
 $\beta$  - rychlost změny okamžité intenzity poruch s časem;  
 $t$  - proměnná doba;  
 $n$  - charakteristická doba života tzv. parametr měřítka.

Významné jsou především tři hodnoty parametru tvaru  $\beta$ :

- pro  $\beta=1$  je Weibullovo rozdělení shodné s exponenciálním rozdělením a okamžitá intenzita poruch  $\lambda(t)$  se stává konstantou rovnou převrácené hodnotě parametru měřítka  $\pi$ ;
- $\beta>1$  je případ zvyšující se okamžité intenzity poruch;
- $\beta<1$  je případ snižující se okamžité intenzity poruch.

Charakteristická doba života  $n$  je taková doba, při které se očekává, že 63,2 % objektů bude mít poruchu. Platí pro všechny typy Weibullova rozdělení bez ohledu na parametr tvaru  $\beta$ . Pokud dochází k výměně objektů, pak se očekává, že 63,2 % dob od poruchy bude kratších nebo se bude rovnat charakteristické době života  $n$ . Další rozbor problémů, které se týkají oprav, a neopravitelných objektů lze najít v IEC 60300-3-5. Zmíněná hodnota 63,2 % je určena z dosazení  $t=n$  do rovnice (2), což následně vede k rovnici (4):

$$F(n) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{n}\right)^\beta} = 1 - \left(\frac{1}{e}\right) = 0,632 \quad [1] \quad (4)$$

kde	$n$	je	Weibullova charakteristická doba života;
	$e$	-	exponenciální funkce;
	$\beta$	-	parametr tvaru;
	$t$	-	proměnná doba;

### 3.2.2 Tříparametrické Weibullovo rozdělení

Funkce kumulativní distribuční funkce tříparametrického Weibullova rozdělení je uvedena v rovnici (5):

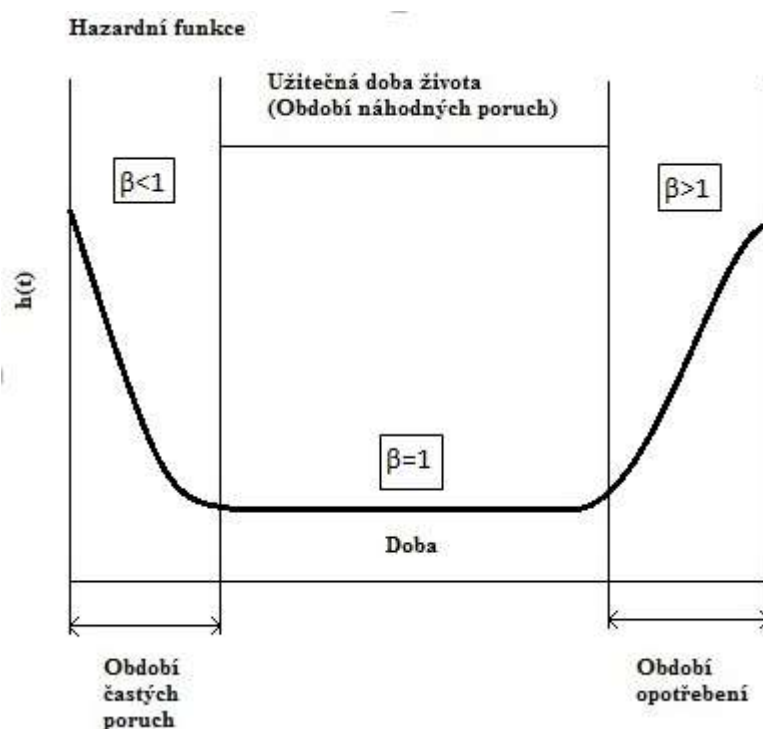
$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{n}\right)^\beta} \quad [1] \quad (5)$$

kde	$t_0$	je	doba bez poruchy, parametr polohy nebo minimální doba života;
	$e$	-	exponenciální funkce;
	$\beta$	-	rychlost změny okamžité intenzity poruch s časem;
	$t$	-	proměnná doba;
	$n$	-	Weibullova charakteristická doba života;
	$F(t)$	-	kumulativní distribuční funkce.

Vliv parametru polohy není většinou dobře chápán, dokud není zpozorována špatná shoda s dvouparametrickým Weibullovým grafem. Pokud je zpozorován nedostatek dobré shody, techničtí pracovníci zkoušejí použít jiné rozdělení, které by mohly poskytnout lepší shody. Nedostatek shody může být urovnán, pokud se data zakreslí pomocí tříparametrického Weibullova rozdělení. Po použití parametru polohy je zjevné, že jsou poruchy produktu posunuty o pevné období nazývané práh. Vliv parametru polohy je obvykle pozorován, když se produkt jeví jako trvanlivý po určitou dobu a poté nastane první porucha. Dobrým indikátorem vlivu parametru polohy je konvexní tvar grafu.

### 3.2.3 Parametr tvaru

Vztah mezi Weibullovým parametrem tvaru  $\beta$  hazardní funkcí v celém rozsahu života objektu nám ukazuje vanová křivka.



Obr. 3 Vanová křivka objektu

$\beta < 1$  označuje vysokou intenzitu poruch, které se mohou vyskytnout jak elektronické, tak mechanické na počátku doby života. Pro minimalizaci těchto poruch výrobci provádějí řízení výrobního procesu, přijímací zkoušky „zahořování“ pro zlepšení bezporuchovosti označované RSS (Reliability Stress Screening), aby se předešlo častým poruchám před předávkou zákazníkovi.

Tento parametr nám tedy označuje tyto problémy:

- s výrobou, montáží nebo špatným řízením kvality;
- s generálními opravami;
- nedostatek přiměřeného řízení procesu;
- záběh nebo časté poruchy;
- atd.

$\beta=1$  takzvané období náhodných poruch z důvodu náhodného výskytu poruchy v čase. Preventivní údržbou se systém nezlepší.

Možné důvody poruch mohou být tyto:

- náhodné přetížení;
- chyba lidského faktoru (náhodná chyba údržby);
- poruchy přirozenou vlastností objektu, úder bleskem, poškození cizím předmětem;
- kombinace více poruch.

$\beta>1$  Zde se vyskytují poruchy opotřebením:

- koroze;
- únava;
- opotřebením;
- šíření trhliny;
- nashromáždění více poškození.

U posledního případu musí být v návrhu provedena taková opatření, aby se tyto jevy nepodílely větší měrou na pravděpodobnosti poruchy produktu po provozní dobu života.

### **3.3 Analýza dat**

Data o době života se týkají objektů, které „stárnou“ do poruchy. Weibullova data o poruchách jsou obvykle data o době života, ale mohou též popisovat data o materiálu, kde ke

„stárnutí“ může docházet vlivem namáhání, síly nebo teploty. Stáří může být doba provozu, počet spuštění a zastavení, počet přistání, počet vzletů, počet cyklů při nízkocyklové únavě, ujetá vzdálenost, doba uložení nebo skladování, počet cyklů nebo doba při vysokém namáhání či vysoké teplotě nebo mnoho jiných spojitých parametrů. V této normě se parametr „stáří“ bude nazývat doba. Když je to požadováno, může být „doba“ nahrazena jakýmkoliv výše uvedeným parametrem „stáří“.

Rozsah výběru a počet platných poruch souvisí s nejistotou s ohledem na odhad parametru Weibullova rozdělení. Tyto parametry mohou být odhadnuty i při použití dvou poruch. Nejistota, která plyne z tak málo informovaného odhadu je ovšem příliš velká a nepoužitelná pro potvrzení použitelnosti Weibullova modelu.

Obecné pravidlo jako u všech statistických analýz: Platí, že čím více dat máme k dispozici, tím lepšího odhadu lze dosáhnout. V případě omezeného počtu dat se musí využít porovnání metod odhadu pomocí regrese prostřední hodnoty a metody maximální věrohodnosti, o kterých bude zmínka v následujících kapitolách.

Při analýze dat o době života, je nutné zahrnout ty data o objektech ve výběru, které neměly poruchu nebo nebyly porouchány při analýze způsobu poruchy. Označení těchto dat je Cenzurovaná data nebo data vyloučená. Jako úplná se nazývají data, u kterých jsou pozorovány doby do poruchy všech objektů. Za vyloučený nebo cenzurovaný objekt je označován takový zkoušený objekt, který nebyl porouchán daným způsobem poruch.

Weibullovu analýzu lze použít už od malých rozsahů výběru. Velikost rozsahu ovšem ovlivňuje konfidenci meze a u malých rozsahů se proto zvyšuje nejistota odhadu pro parametry doby života. Proto zde platí, že se zvýšením rozsahu se zmenšuje nejistota odhadu. U výsledků založených na malém rozsahu se musí zvážit nejistota a tato rozhodnutí je dobré nejvhodněji zpřesnit sběrem a analýzou dalších dat.

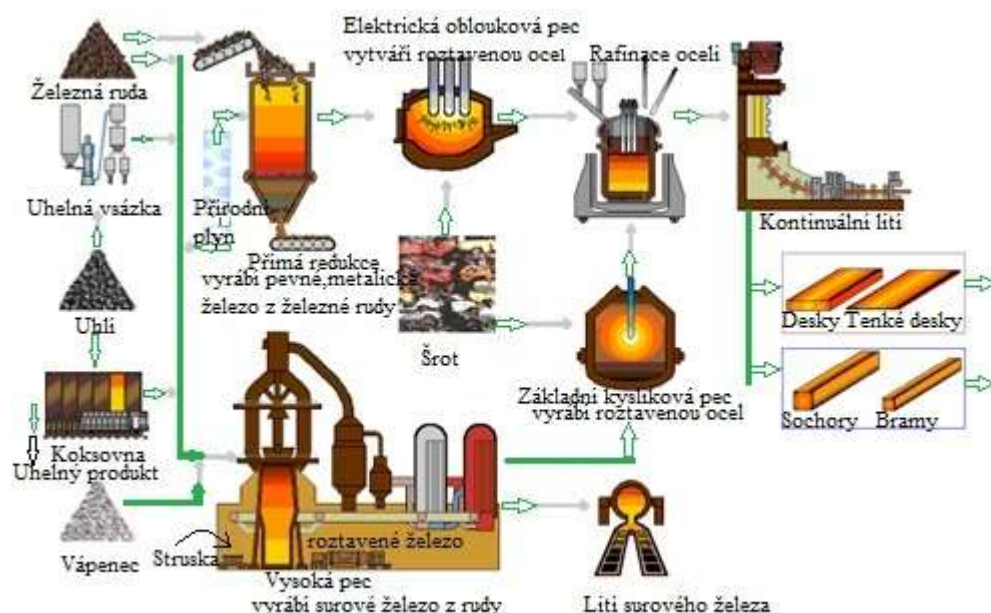
V určitých případech může být první nebo poslední bod analýzy značně odlehlý a z jistých důvodů nepatří do datového souboru. Tyto body se nazývají odlehlé. Pro analýzu dat o době života mohou být tyto body velmi důležité. Proto je nutné jejich zkoumání z inženýrských hledisek záznamu dat, kalibrace přístrojů, záznamů ze zkoušky a jiných pro zjištění příčiny velkého rozptylu těchto bodů. Jejich význam je z hlediska zajištění bezporuchovosti významný, protože může poukazovat na základní soubor slabých objektů.

Weibullovu analýzu používá tři hlavní skupiny metod pro odhad parametrů. Jsou to výpočetní, grafické a WeiBayesovy metody.[1]

## 4 Model hodnocení životnosti technického systému

Tekutá ocel, která je připravena v pánvi na zařízení plynulého odlévání, postupně vytéká do mezipánve, odkud je poté rozdělována do jednotlivých licích proudů, které vytékají do krystalizátorů. První a nejvýznamnější smyčkou licího proudu je právě krystalizátor. Tam se utvoří ztuhlá skořepina s takovou pevností, aby dokázala udržet obsah (tekuté jádro), které je následně plynule vytahováno z krystalizátoru jako předlitek (kontislitek). Krystalizátor se vyrábí z velmi čisté měděné slitiny. Jeho primární funkcí je ochlazování tekuté oceli pro další zpracování, které je řešeno vodním okruhem. Krystalizátor je právě naším zkoumaným předmětem, na kterém se zjišťovalo hodnocení životnosti technického systému.

Hlavní výhodou vyspělé technologie kontilit, která převládá nad klasickým litím do kokil, je zefektivnění výrobního postupu, spojené s úsporami energie, snižováním předváhy, příznivým ekologickým dopadem a návratností investic (ekonomické hledisko) a zvýšení jakosti odlévané oceli. Rychlý rozmach plynulého odlévání oceli od sedmdesátých let minulého století až po současnost naznačuje, že v průmyslové oblasti vznikly kvalitní podmínky pro uplatnění této všestranně vzrůstající technologie v hutních podnicích. Zařízení pro plynulé odlévání oceli již často patří k základnímu vybavení moderních oceláren, viz následující obrázek číslo 4.[5]



Obr. 4 Zařízení pro plynulé odlévání oceli

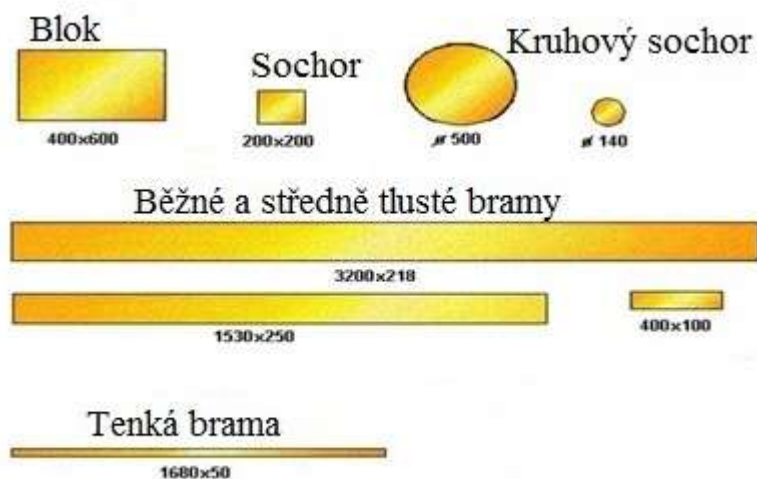
## 4.1 Druhy profilů

Tekutá ocel, která je přistavena na zařízení plynulé odlévání (ZPO) v pánvi, vytéká do mezipánve, odkud je rozdělována do jednotlivých licích proudů, které pak tečou do krystalizátorů. Výstup oceli z krystalizátorů je znázorněn na obrázku číslo 5.



Obr. 5 Výstup z krystalizátorů

Typické tvary příčných průřezů profilů vyráběných na zařízení plynulé odlévání (ZPO) jsou znázorněny na následujícím obrázku číslo 6.



Obr. 6 Druhy profilů pro plynulé odlévání

## 4.2 Popis odlévání

Prvním a nejdůležitějším uzlem lícího proudu je krystalizátor, kde se vytváří první tuhá fáze ve formě lící kůry. Na začátku odlévání je spodek krystalizátoru utěsněn ocelovým táhlem (zátkou), která je držena hydraulicky jednotkou. Tato zátku předchází tekutou ocel z konce krystalizátoru dále přes stroj plynulého odlévání. Z krystalizátoru je plynule vytahován tzv. předlitek (kontislitek), který má ještě tekuté jádro. Krystalizátor osciluje v podélném směru a jeho stěny jsou mazány roztaveným lícím práškem nebo olejem.

Odlitá ocel je částečně ztuhlá, tj. má po obvodu ztuhlou skořepinu, ale tekuté jádro. V primární chladicí oblasti (krystalizátoru) má ztuhlá skořepina tloušťku mezi 10 až 20 mm. Jednotka tažných válců začne táhnout zátku následovanou částečně ztuhlou ocelí. Tekutá ocel musí být doplňována do formy stejnou rychlostí, jakou se pohybuje za formou pomocí tažných válců. Lící rychlost je závislá tvaru profilu a jeho velikosti a tříde lité oceli obvykle se pohybuje v rozsahu 0,3 do 8 m/min. Čas lití se pohybuje mezi 0,5 až 1,5 hodinou, aby nevzniklo nadměrnými tepelnými ztrátami v mezipánvi. Po opuštění krystalizátoru prochází litý profil klecí sekundárního chlazení, kde je tuhnoucí proud chlazen sprchován vodou nebo kombinací vody a vzduchu, které způsobuje další tuhnutí proudu. Tato oblast zajišťuje konečný tvar profilu a jeho integritu a zároveň kvalitu. Velké profily (bramy) potřebují rozšířenou klec sekundárního chlazení s tažnými válci. Když je celý proud ztuhlý a projde celou oblastí tažných válců, je zátku oddělena a uskladněna pro další použití. Po vyjití proudu z klece je tento dělen na jednotlivé kusy odlévaných výrobků: sochory, bloky, válce, nosníky a bramy. Sochory mají plochu profilu až 46 cm<sup>2</sup>. Bloky mají průřez 46 do 150 cm<sup>2</sup>. Kruhové profily mají průměr mezi 120 mm do 500 mm. Bramy mají tloušťku od 50 do 400 mm a šířku větší než 1300 mm. Nosníkové profily mají tvar I-nosníku. Poměr stran mezi tloušťkou a šířkou rozděluje bloky a bramy. Je-li poměr stran 2,5:1 nebo větší je výsledný produkt nazýván bramou. Na obrázku 7 je zobrazený postup lití oceli.[5]

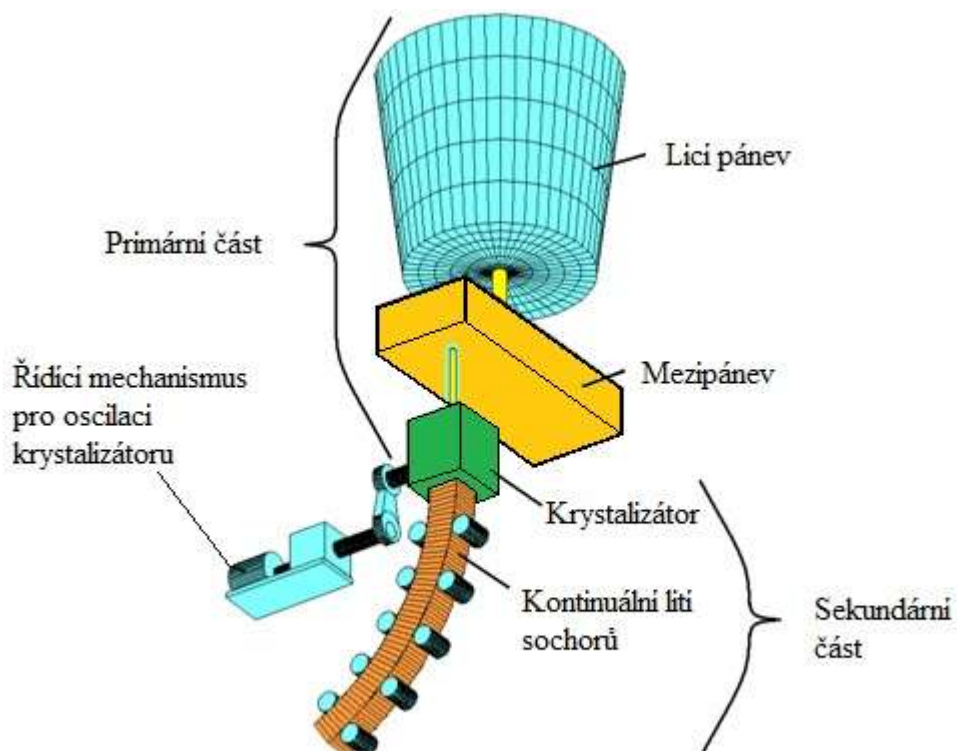
Proces plynulého odlévání lze rozdělit do následujících sekcí:

- mezipánev, je umístěna nad krystalizátorem a přísun tekuté oceli do krystalizátoru se děje regulovanou rychlostí;
- primární chladicí zóna neboli vodou chlazená měděná forma, kde vzniká po obvodu ztuhlá skořepina. Proud již se ztuhlým povrchem vstupuje do sekundární zóny;



- sekundární chladicí zóna je pod krystalizátorem, ztuhlý povrch je chlazen vodními nebo vodo-vzdušnými tryskami a proud dále tuhne. Lící stroj může mít přímou nebo i zahnutou část;
- dělicí mechanismus (mechanický nebo hořákový), který rozděluje proud na jednotlivé části, které odcházejí k dalším technologickým procesům;
- sekundární oblast chlazení s vodním ostřikem se nachází pod krystalizátorem, kde se odvádí především latentní teplo tuhnutí a celý průřez předlitku postupně tuhne;
- terciární oblast chlazení, kde předlitek chladne volně na vzduchu při odvodu tepla konvekcí a sáláním.

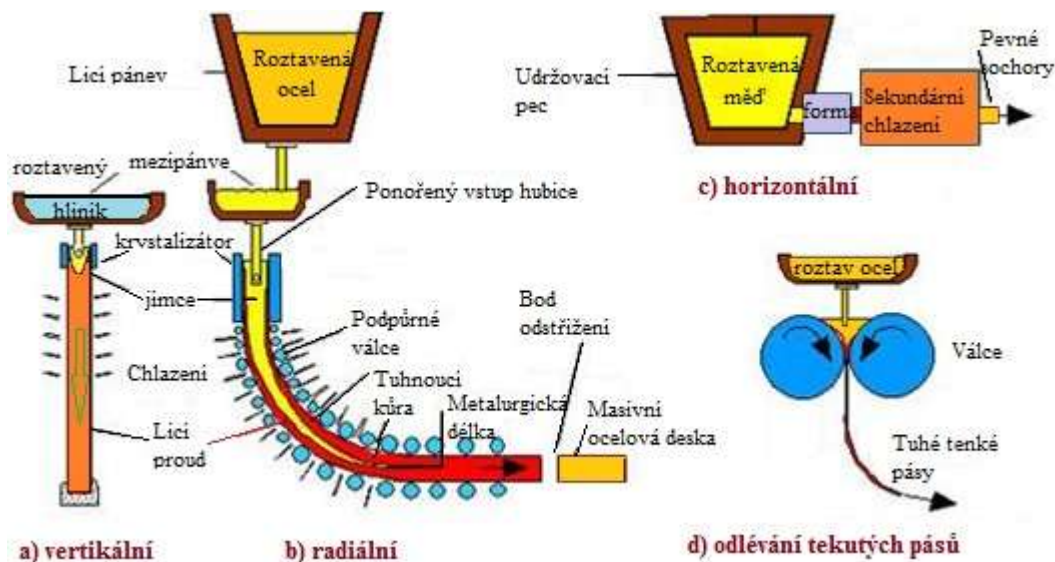
Tekutá ocel z pánve do krystalizátoru je dopravována ve dvou krocích. V prvním je dopravena z pánve do mezipánve a teprve ve druhém je z mezipánve dopravena do krystalizátoru. Regulace toku z pánve do krystalizátoru je prováděna: stavidlem, zastavovacími tyčemi, počítací tryskou a kontrolováním hladiny v mezipánvi.



Obr. 7 Popis lícího procesu

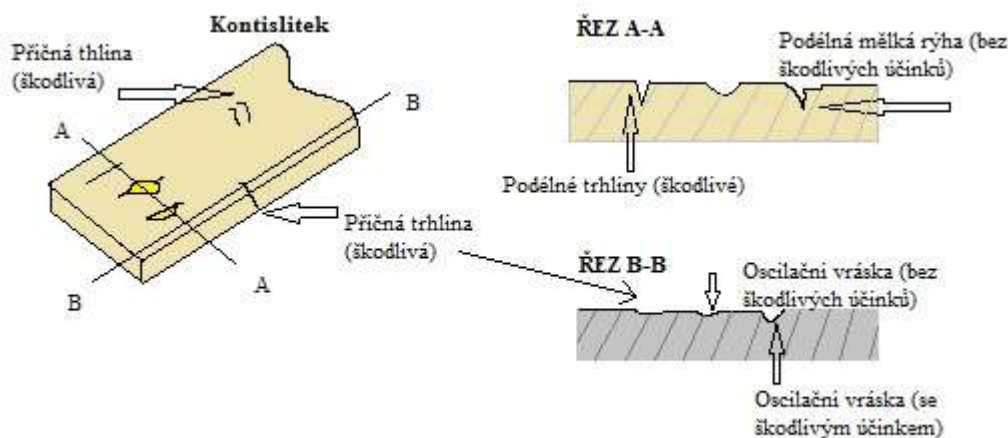
## 4.3 Základní typy ZPO

Existují tři základní typy zařízení plynulého odlévání, které jsou popsány na obrázku 8. Jsou to vertikální (bez ohybu předlitku nebo s ohybem předlitku) viz obr. 8a), radiální viz obr. 8b) a horizontální na obr. 8c). Velmi pokrokovou technologií ZPO je také odlévání tenkých pásů a plechů, viz obr. 8d).



Obr. 8 Typy zařízení plynulého odlévání

Hlavním předpokladem jakostní výroby na zařízení plynulého odlévání je dokonalá tepelná práce krystalizátoru. Vady předlitků, znázorněné na obrázku 9, (tj. nerovnoměrné chemické složení, vnitřní i vnější trhliny, povrchové vady typu zatavených hnízd licího prášku, podélné rýhy v licí kůře, nadměrné oscilační vrásky, chyby tvaru a další) mají svou prvotní příčinu v krystalizátoru.



Obr. 9 Druhy vad předlitků

Zvlášť nežádoucí jsou trhliny v licí kůře předlitku, způsobené ferostatickým tlakem, teplotním pnutím, třením v krystalizátoru a dalším mechanickým namáháním, které mohou vést k protržení kůry a průvalu.

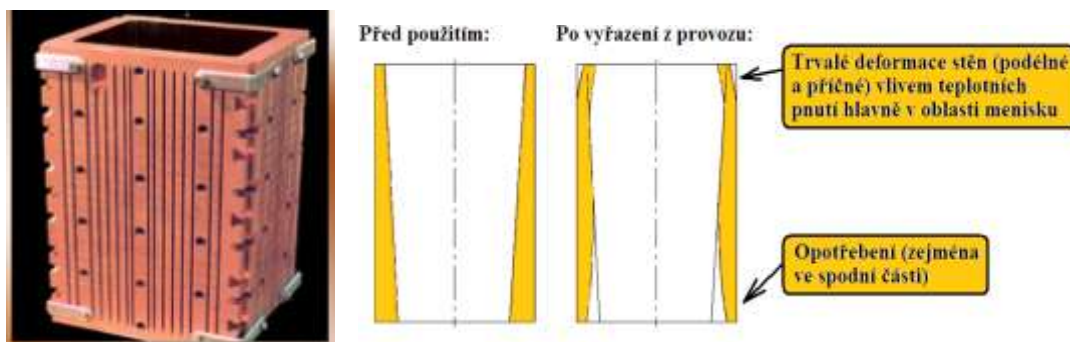
Teplotní pnutí v kůře předlitku je vyvoláno nerovnoměrným smrštěním při nesymetrickém a intenzivním chlazení. Nebezpečný je také vliv tvarových změn krystalizátoru, vyvolaný tepelným a mechanickým namáháním, který má vliv na snížení odvodu tepla z důvodu vzniku nadměrné mezery mezi licí kůrou a stěnou krystalizátoru.

Průval je situace, kdy kůra předlitku praskne a tekutý kov přímo vytéká z poškozeného předlitku a výroba musí být okamžitě zastavena, což je vždy spojeno s poměrně vysokými ekonomickými ztrátami.

Kvalita produkce a bezpečnost výroby z hlediska vzniku průvalů souvisí jednak s technologií odlévání, ale také s celou konstrukcí a seřízením licího stroje. Oba aspekty jsou stále předmětem častého vývoje a zdokonalování. Složitost procesů při plynulém lití oceli téměř nedovoluje zobecňování a přenositelnost výsledků z jednoho zařízení na druhé, dokonce na tomtéž licím stroji (krystalizátoru) jsou zcela jiné podmínky při odlévání různých formátů nebo různých značek ocelí.

#### **4.4 Moderní trendy a problémy výzkumu za provozu**

Moderní trend zvyšování licích rychlostí, klade náročné požadavky na krystalizátory. U kokil krystalizátorů je vyžadována stálost rozměrů, odolnost vůči opotřebení (obrázek 10) a vysoká tepelná vodivost. Kokila krystalizátoru je vystavena extrémnímu cyklickému, tepelnému a mechanickému namáhání. V kokile krystalizátoru je vysoký teplotní rozdíl mezi vnějším a vnitřním povrchem, který je důsledkem velké hustoty tepelného toku. Tím vznikají teplotní pnutí a plastické deformace, které jsou z hlediska provozu nežádoucí. Krystalizátory jsou vyřazovány z provozu v podstatě ze dvou důvodů, a to vlivem ztráty konicity opotřebením, a také vlivem trvalé deformace stěn kokil krystalizátoru. Největší deformace jsou v oblasti hladiny oceli a těsně pod ní.



Obr. 10 Opotřebení krystalizátoru

Experimentální výzkum krystalizátorů je složitý a to z důvodu vysokých teplot a nebezpečí plynoucího z přítomnosti tekuté oceli v těsné blízkosti chladicí vody. Konstrukční úpravy zařízení před experimentem jsou nákladné a mohou zdržovat výrobu. Experimentální výzkum proto musí vždy probíhat v součinnosti výrobního podniku s experimentátorským pracovištěm, které se musí podřídít prioritám výroby. Vedle experimentálního výzkumu má svou nezastupitelnou pozici také matematické modelování.

Materiálem pro výrobu krystalizátorů je měď, obvykle legovaná malým množstvím přísad zejména pro zvýšení tvrdosti povrchu a odolnosti vůči opotřebení, současně se dosahuje také zvýšení rekrytalizační teploty. Jedná se zejména o legující prvky P, Ag, Cr, Zr, Co a Be.

#### Legování:

- zpomaluje opotřebení stěn vlivem abrazivních účinků licí kůry a licího prášku, zvyšuje rekrytalizační teplotu, zvyšuje modul pružnosti, mez kluzu a mez pevnosti materiálu, prodlužuje životnost vložky krystalizátoru;
- snižuje součinitel tepelné vodivosti.

Vliv legujících přísad na koeficient teplotní roztažnosti materiálu je minimální. Z předchozího plyne, že řešení problému plastických deformací stěn krystalizátoru nespočívá pouze ve volbě materiálu desky. Technické řešení představuje velmi náročný interdisciplinární problém, který zahrnuje disciplíny konstrukce, pružnosti-pevnosti a plasticity, tepelné techniky, materiálového inženýrství, experimentálních metod a numerických metod.[5]

## 5 Systém měření MKL 100/420

Tento systém byl vytvořen pro měření rozměrů krystalizátorů ZPO s následným vytvořením databáze pro kontrolu konicity, opotřebení a podrobné vedení evidence. Pro kontrolu dodržení předepsaných tolerancí u nových krystalizátorů a hodnocení časového vývoje opotřebení v provozu nasazených krystalizátorů po celou dobu jejich životnosti slouží vizualizační a hodnotící programy.

Pro celkové hodnocení životnosti krystalizátoru, jsou takto získané parametry vhodné pro celkové hodnocení životnosti krystalizátorů a nalezení optimální doby jejich použití při plynulém odlévání na ZPO. Měřicí systém MKL 100/420 je přenosný a dá se automaticky nakonfigurovat podle měřeného formátu. Je vybavený softwarem pro řízení měření a základní zpracování naměřených dat a dále obsahuje řídicí elektroniku. Technické parametry systému jsou popsány v tabulce 1. Samotný přístroj je vyobrazen na obrázku 11.

Systém MKL 100/420 obsahuje tři základní části:

- **upínací mechanismus** – jeho rozměry jsou závislé od každého měřeného kusu. Zabezpečuje uchycení měřicího dílu v otvoru krystalizátoru pro udržení v měřicí poloze a jeho orientaci ke směru lití;
- **měřicí díl** – podstatou tohoto dílu je bezkontaktní laserový měřič distance, který je umístěný na mechanickém přesném vedení. Další důležitou součástí jsou řízené servopohony, které v dutině krystalizátoru ovládají natáčení měřidel v intervalových úhlových krocích od jednoho stupně v horizontální rovině, a posun měřidla ve vertikálním směru je umožněn ve dvaceti volitelných úrovních. Měření rozměrů uprostřed stěn je prováděno u čtvercových krystalizátorů. Zde je možné upínací mechanismus volitelně doplnit o měření podél stěn cca 30 mm od rohu krystalizátoru. Provedení kalibrace před vlastním měřením je zajištěno pomocí referenční délky odměřené v upínacím mechanismu;
- **řídicí elektronika** – její základ tvoří průmyslový počítač MiniPanel PPC-55, který je vybaven LCD obrazovkou. Vše je umístěno v přenosné brašně a spojení s vlastním měřidlem je zajištěno 3m

kabelem. Dotyková LCD obrazovka nabízí přímé ovládání pomocí MENU. Pro zadávání údajů je zde malá membránová klávesnice. Měření je řízeno podle zadaného algoritmu zcela automaticky.[3]

**Tabulka 1 Technické parametry systému MKL 100/420**

Název:	Bezkontaktní laserové měření
Nastavitelný rozsah	150 - 450 mm
Rozlišení	6 $\mu\text{m}$
Rozsah měření hloubky	0 - 800 mm
Přesnost nastavení úrovně měřené hladiny	+/- 0,1
Napájení	220 V, 80 VA
Rozměr řídicí jednotky s brašnou	390x220x160 mm
Rozměr mechanismu	220x220x160 mm
Váha	cca 12 kg
Přenos dat	standartní linky, volitelně infra
Operační systém měření	MS-DOS 6.22
Operační systém vizualizace a zpracování	MS Windows



**Obr. 11 Systém MKL 100/420 pro měření na krystalizátorech**

V tabulkách 2, 3 a 4 je ukázka výstupů z měření kruhového krystalizátoru. Data z prováděných měření budou využita při tvorbě modelů spolehlivosti kruhového krystalizátoru, které jsou hlavním cílem této diplomové práce a které jsou popsány v dalších kapitolách.

**Tabulka 2 Výstup z měření kruhového krystalizátoru**

cislo vložky:	587-0-A										
cislo mereni:	1										
cislo renovace:	0										
format:	410a										
datum mereni:	29,8,2006										
cas mereni:	11:40										
pocet hladin:	18										
pocetvertikalnich poloh:	119										
meril:	Dasfos										
odlito tun:	0										
ASP:	416,14										
RSP:	100,02										
SOD : 0,12											
strSOprum: 0,49											
ROZMERY											
hladina	hloubka	0	3	6	9	12	.....	180	354	357	průměr
1	10	208,73	209,02	209,91	210,65	210,44	.....	208,93	210,42	209,78	419,47
2	49	208,23	208,9	209,51	210,15	210,08	.....	208,71	210,01	209,6	418,8
3	88	208,58	208,66	209,23	209,73	209,64	.....	208,59	209,53	209,45	418,35
4	127	208,74	208,43	208,83	209,34	209,23	.....	208,46	209,19	208,77	417,75
5	166	208,19	208,26	208,57	209,1	208,74	.....	208,39	208,98	208,59	417,21
6	205	208,33	208,47	208,49	209,05	208,48	.....	208,5	208,6	208,41	417,08
7	244	207,98	208,42	208,32	207,45	207,44	.....	208,03	208,06	208,43	416,03
8	256	208,11	208,26	208,32	208	208,09	.....	208,33	207,85	208,02	416,25
9	290	208,05	208,22	208,11	208,14	207,82	.....	208,47	207,8	208,13	416,19
10	324	208,12	207,92	207,99	207,95	208,08	.....	207,79	207,79	207,84	415,87
11	358	207,92	208,13	207,89	207,89	207,81	.....	207,63	207,42	208	415,67
12	392	207,92	207,54	207,61	207,81	207,86	.....	207,69	207,64	207,6	415,42
13	426	207,56	207,71	207,92	207,82	207,76	.....	207,56	207,65	207,58	415,39
14	460	207,58	207,51	207,63	207,46	207,63	.....	207,36	207,36	207,37	414,98
15	494	207,35	207,67	207,53	207,35	207,27	.....	207,59	207,33	207,51	414,9
16	528	207,34	207,74	207,72	207,42	207,32	.....	207,37	207,24	207,32	414,87
17	562	207,39	207,33	207,52	207,34	207,32	.....	207,27	207,27	207,13	414,64
18	590	207,2	207,27	207,26	207,25	207,1	.....	207,14	206,62	207,52	414,34

**Tabulka 3 Výstup z měření kruhového krystalizátoru**

RELATIVNÍ KONICITA V HORIZONTÁLNÍM REZU MEZI HLADINAMI								
hladiny	prumer	uhel	0	3	6	9	.....	177
1- 2	3.6		4.38	2.44	4.56	5.37	.....	2.6
2- 3	3.57		-1.38	1.68	3.12	4.8	.....	2.53
3- 4	2.79		-0.19	3.77	4.65	5.57	.....	6.41
4- 5	3.23		3.79	1.27	2.8	2.21	.....	1.64
5- 6	2.8		-1.51	-1.71	0.28	3.54	.....	2.8
6- 7	3.6		5.1	0.08	5.64	12.72	.....	-1.49
7- 8	1.14		-8.53	-5.56	-2.25	-12.14	.....	28.9
8- 9	0.51		-0.6	4.41	-0.32	-0.73	.....	-1.67
9-10	1.7		4.36	4.97	3.39	2.2	.....	1.17
10-11	1.46		2.52	-2.53	2.73	0.8	.....	-1.23
11-12	1.79		-0.38	5.41	2.59	2.71	.....	5.44
12-13	1.41		3.47	0.03	-1.64	0.19	.....	0.22
13-14	0.66		1.25	1.83	2.84	2.39	.....	1.28
14-15	1.92		-0.06	0.94	0.34	2.43	.....	1.7
15-16	1.18		1.7	-0.57	0.34	0.43	.....	2.46
16-17	1.35		0.29	3.83	1.4	-0.45	.....	0.67
17-18	-0.53		2.85	-1.15	4.56	-0.21	.....	-1.13

**Tabulka 4 Výstup z měření kruhového krystalizátoru**

Zakladni prumer:	414.06										
Tolerance zakladniho prumeru:	0.2										
Posunuti zakladniho prumeru:	0.36										
HODNOCE NI HLADIN											
hladina	hloubka [mm]	prumer vykres [mm]	prumer namery [mm]	plocha rezu vykres [mm2]	plocha rezu namere na [mm2]	smerodat na odchylka [mm]	kruhovitost [mm]	tolerance kolem pos. ZP [mm]	cetnost v toleranci [%]	delta Xc [mm]	delta Yc [mm]
1	10	419.34	419.3	138110	138085	0.6977	0.52	0.1	12.5	-0.18	-2.43
2	49	418.8	418.71	137756	137697	0.6055	0.45	0.1	16.67	-0.15	-1.21
3	88	418.27	418.13	137402	137314	0.4385	0.34	0.1	16.67	-0.05	-0.13
4	127	417.73	417.68	137049	137015	0.3744	0.36	0.1	18.33	0	0.85
5	166	417.19	417.15	136696	136670	0.2701	0.27	0.1	23.33	0.06	1.71
6	205	416.65	416.69	136344	136372	0.1993	0.33	0.1	45	0.17	2.42
7	244	416.11	416.11	135992	135989	0.2278	0.34	0.1	42.5	0.2	3.4
8	256	416	416.05	135915	135952	0.2358	0.34	0.1	43.33	0.24	3.27
9	290	415.8	415.98	135786	135905	0.2521	0.33	0.1	34.17	0.28	3.69
10	324	415.6	415.74	135657	135748	0.227	0.36	0.1	40.83	0.28	4.3
11	358	415.4	415.53	135528	135613	0.2868	0.55	0.1	32.5	0.33	4.28
12	392	415.21	415.28	135400	135448	0.2283	0.36	0.1	33.33	0.4	4.44
13	426	415.01	415.08	135271	135318	0.2351	0.44	0.1	38.33	0.48	4.5
14	460	414.81	414.99	135143	135257	0.1502	0.26	0.1	40	0.52	4.56
15	494	414.61	414.72	135014	135081	0.1503	0.2	0.1	55	0.53	4.42
16	528	414.42	414.55	134886	134973	0.1714	0.26	0.1	47.5	0.61	4.26
17	562	414.22	414.36	134757	134848	0.1696	0.31	0.1	47.5	0.69	4.7
18	590	414.06	414.42	134652	134889	0.1895	0.2	0.1	25	0.77	3.89



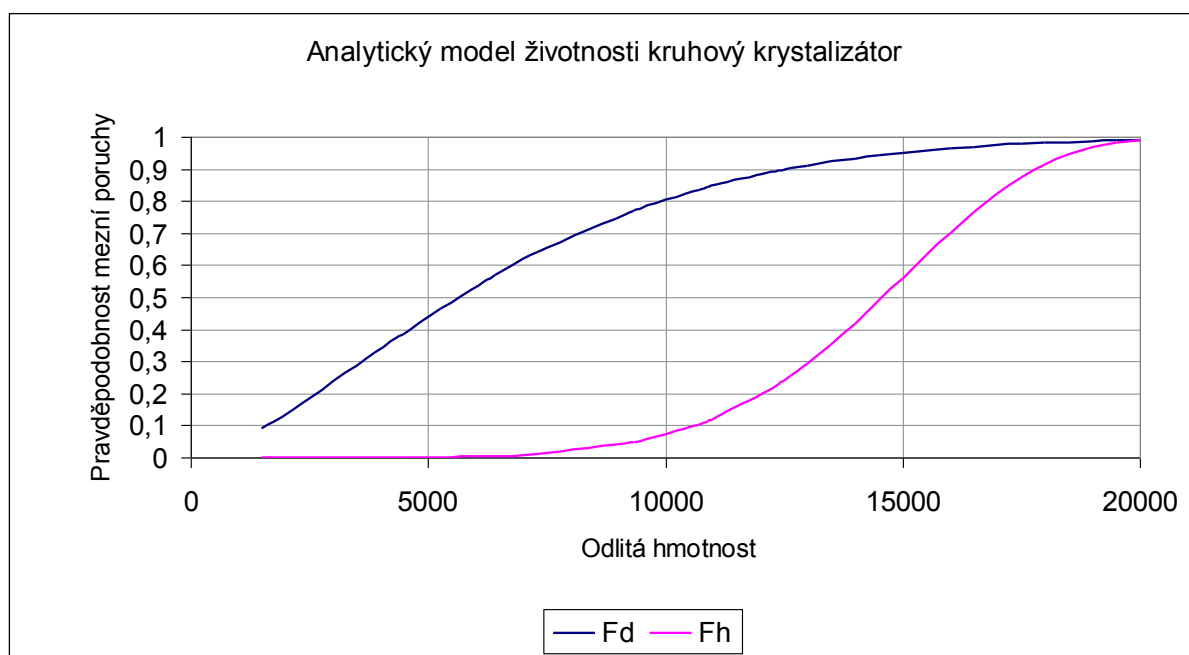
## 6 Hodnocení modelování životnosti krystalizátoru

V rámci řešení budou vypracovány dva modely životnosti krystalizátoru – první založený na analytickém vyjádření degračního mechanismu převedený na tvar pravděpodobnosti mezní poruchy s uplatněním Weibullova rozdělení, druhý model využívající umělé neuronové sítě založený na závislosti četnosti jednotlivých značek odlitých ocelí a průměrné hodnoty profilu krystalizátoru na jednotlivých měřených hladinách systémem MKL 100/420.

### 6.1 Analytický model

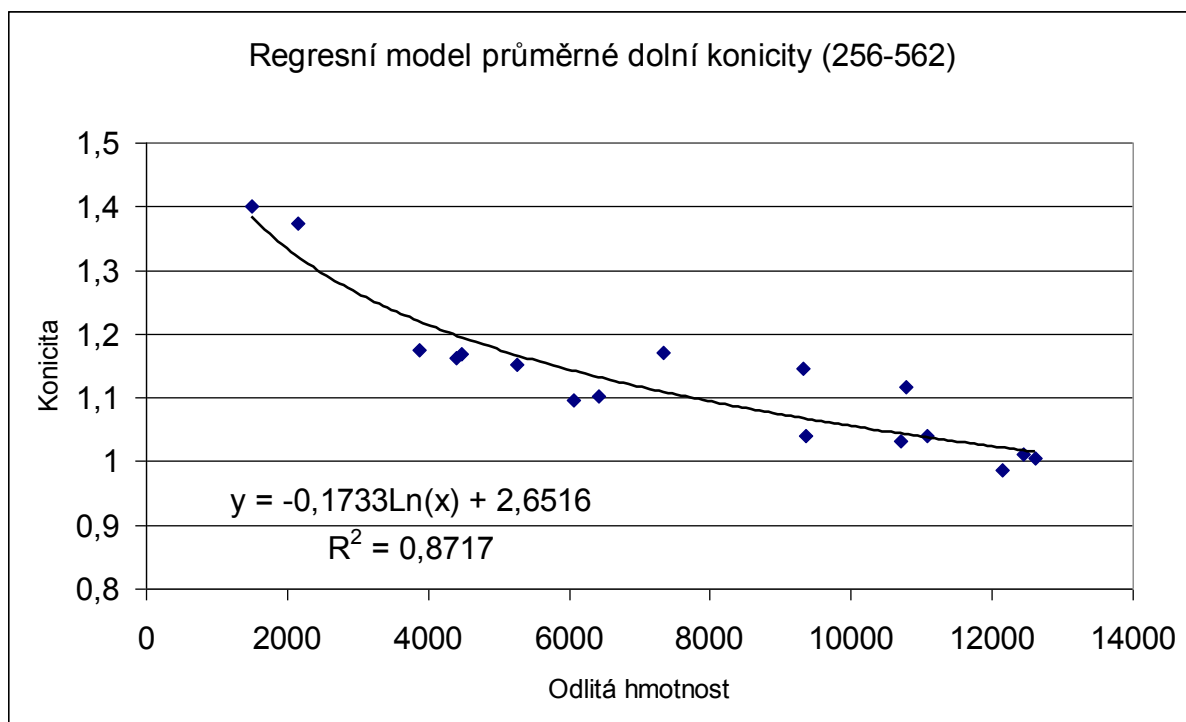
Základem modelu je statistický model [10], který stanovuje parametr tvaru Weibullova rozdělení pro jednotlivé degrační mechanismy. Budeme pracovat s dvouparametrickým Weibullovým rozdělením. Dominantním degračním mechanismem u kruhového krystalizátoru, který je předmětem řešení, je opotřebení stěn vlivem procházející taveniny, které je snižováno přidáváním mazacího prášku v rámci technologického procesu odlévání.

Pro tento degrační mechanismus je stanoven interval parametru tvaru Weibullova rozdělení 1,5 až 6. Na základě těchto hodnot je dopočítán parametr měřítka Weibullova rozdělení pro předpokládanou projektovanou životnost krystalizátoru. Vytvářený model je řešen pro projektovanou životnost krystalizátoru stanovenou na 20000 odlitých tun, a tedy parametry měřítka byly stanoveny  $1,62817 \cdot 10^{-06}$  a  $7,19558 \cdot 10^{-26}$ . Na obrázku 12 jsou křivky vymezující působnost vytvářeného modelu, tedy závislost pravděpodobnosti mezní poruchy na odlitém množství oceli.



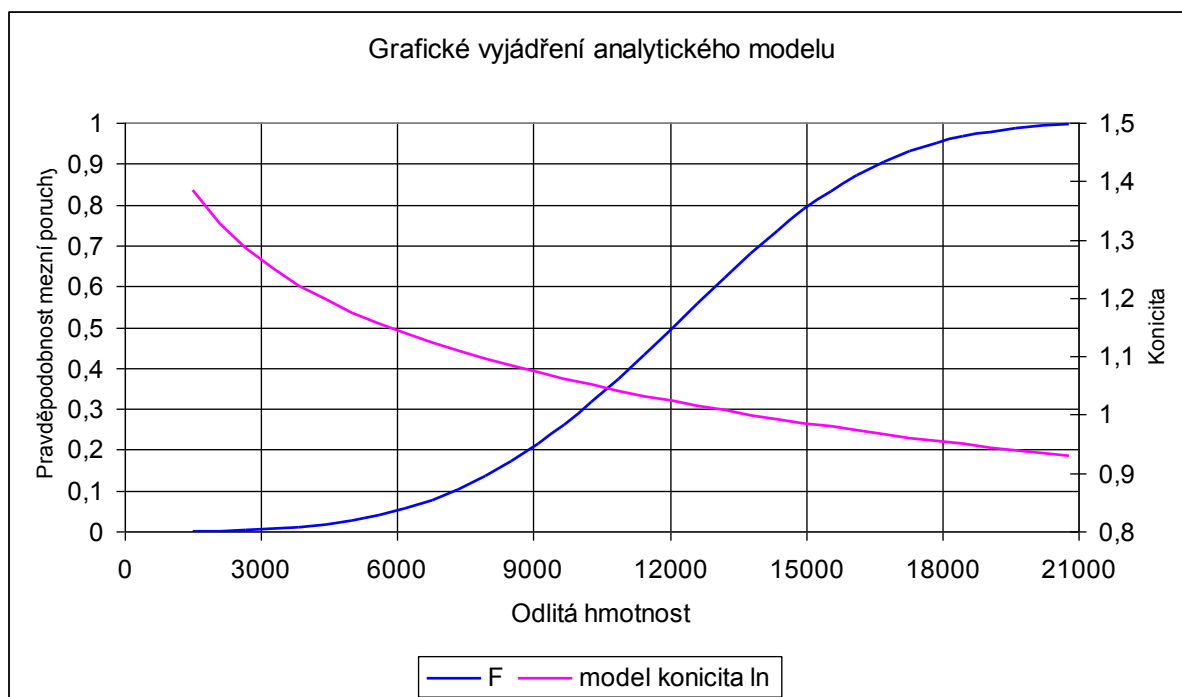
Obr. 12 Analytický model životnosti kruhového krystalizátoru

Následně byl vytvořen regresní model průměrné dolní konicity krystalizátoru na základě měření opotřebení krystalizátoru měřícím systémem MKL 100/420, kterou považujeme za diagnostický parametr. Do modelu byly zahrnuty vybrané měřené krystalizátory, u kterých bylo provedeno průměrně 4 měření do 12000 odlitých tun. Jednotlivé naměřené hodnoty byly validovány testem extrémních odchylek z důvodu minimalizace chyby vstupních údajů. Na obrázku 13 je grafické znázornění výsledného regresního modelu průměrné dolní konicity.



Obr. 13 Regresní model průměrné dolní konicity (256-562)

Výsledný analytický model je pak vytvořen spojením střední závislosti pravděpodobnosti mezní poruchy při předpokladu weibullova rozdělení pravděpodobnosti s parametry stanovenými v závislosti na dominantním degradačním mechanismu a regresním modelem diagnostického parametru, v daném případě průměrné dolní konicity. Grafické znázornění tohoto modelu je na obrázku 14.



Obr. 14 Grafické vyjádření analytického modelu

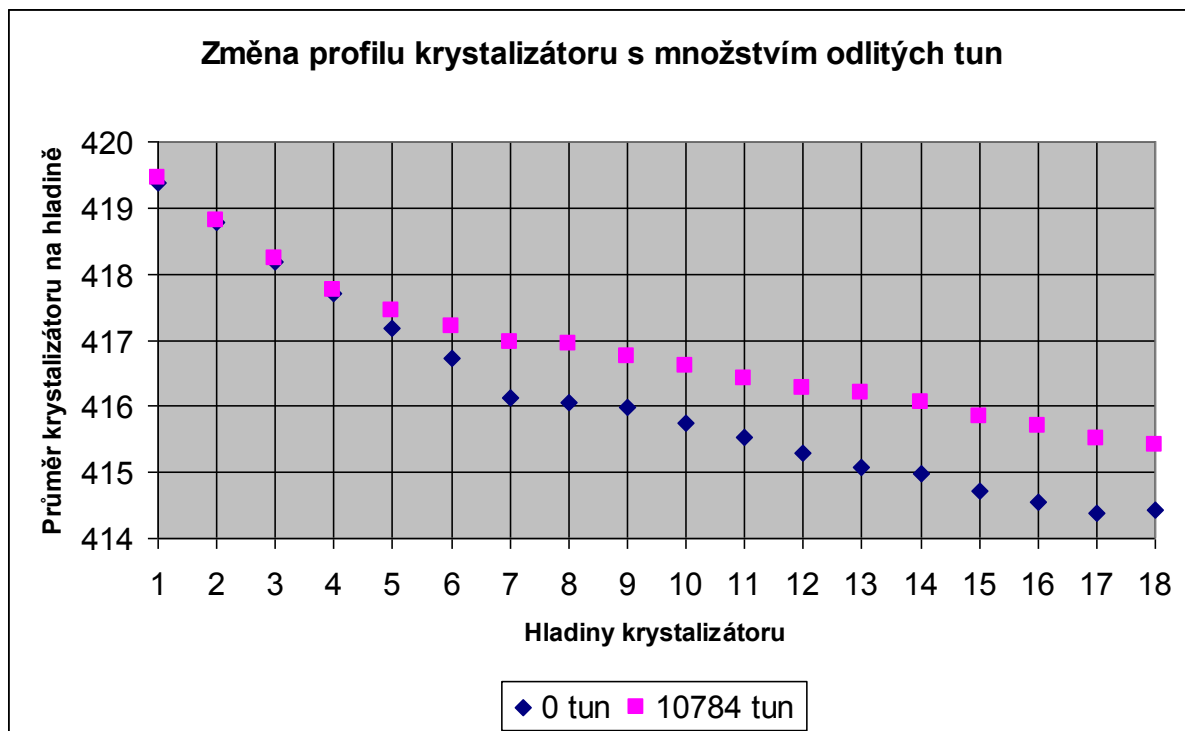
## 6.2 Model s využitím umělých neuronových sítí

Tento model má za účel graficky znázornit průměrný profil krystalizátoru po odlití zadaného množství oceli a specifikaci četnosti jednotlivých značek ocelí. Význam modelu spočívá v možnosti plánování jednotlivých sekvencí a kampaní s definováním značek a jejich četnosti v závislosti na profilu krystalizátoru s následnou možností stanovení parametrů krystalizátorů např. průměrnou dolní konicitu, kterou považujeme za diagnostický parametr pro tento typ krystalizátorů.

### 6.2.1 Postup tvorby modelu

Při tvorbě modelu byly využity informace z Výrobního informačního systému, ve kterém jsou uloženy všechny údaje o odlitých tavných na zvoleném zařízení plynulého odlévání s možností vyhledání informací k vybraným krystalizátorům, které byly vybrány pro tvorbu modelu. Na vybraných krystalizátorech, tak jako v případě analytického modelu, musely proběhnout průměrně 4 měření systémem MKL 100/420 a průměrné množství odlité oceli bylo 12000 tun.

Systém MKL 100/420 proměřuje profil kruhového krystalizátoru na 18 hladinách po výšce krystalizátoru a po 3 stupních po obvodu krystalizátoru. Pro jednotlivé hladiny byly stanoveny střední hodnoty průměru krystalizátoru. Na obrázku 15 je znázorněna změna profilu krystalizátoru v závislosti na množství odlitých tun oceli.



Obr. 15 Změna profilu krystalizátoru s množstvím odlitých tun

Jednotlivá měření rozdělila oblast využití krystalizátoru na úseky, kterým byly přiřazeny četnosti jednotlivých značek, které v daném úseku provozování krystalizátoru byly odlity. Tímto způsobem vznikly pro každou měřenou hladinu trénovací množiny, které následně byly zpracovány softwarovým systémem STATISTICA, který tak vytvořil 18 neuronových sítí, které jsou základem tohoto modelu.

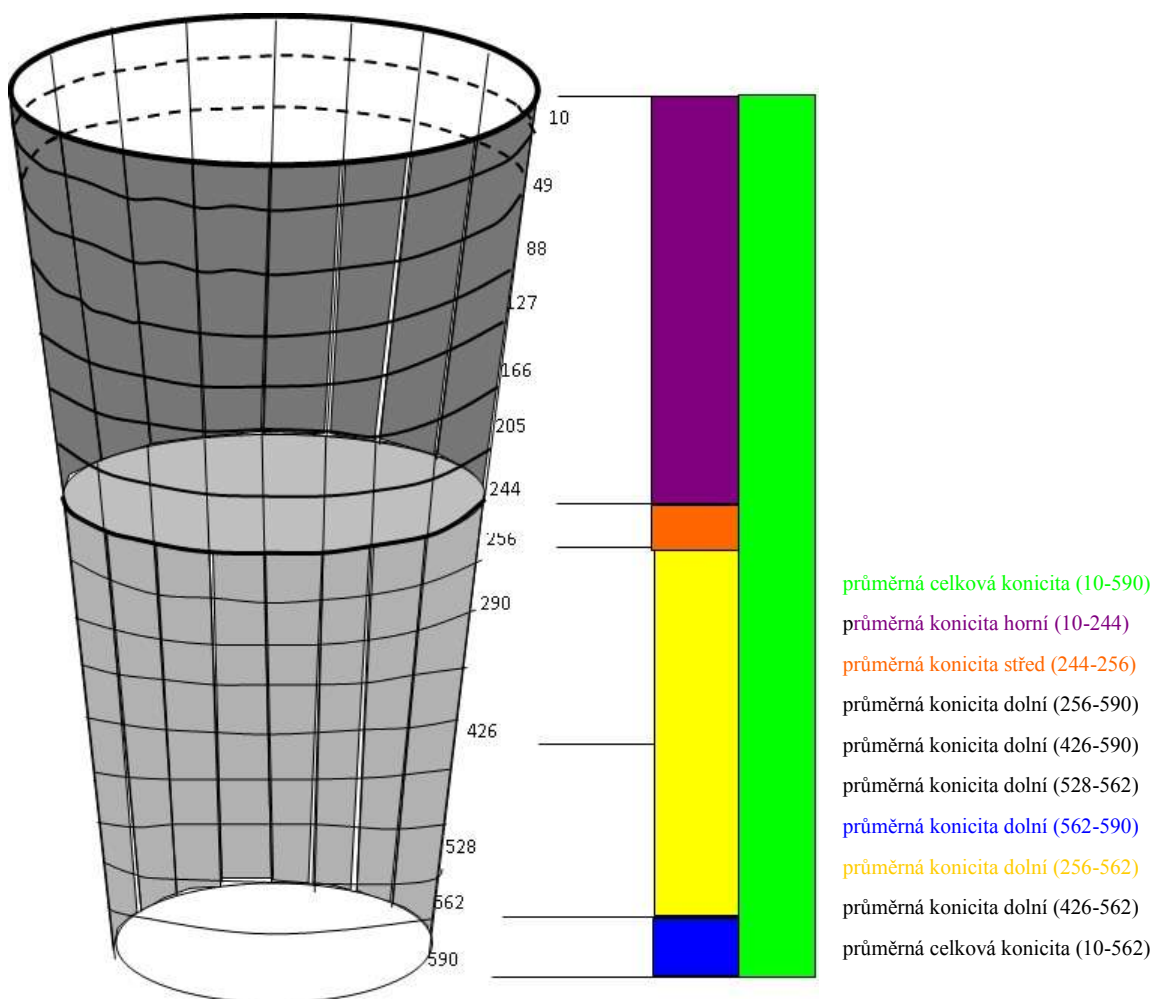
V tabulce 5 je příklad takovéto trénovací množiny pro jednu měřenou hladinu. Pro zkvalitnění učení neuronové sítě byly do tabulky přidány i kombinace měřených úseků, tzn. četnosti, byly v tomto případě nahrazeny kumulativními četnosti pro jednotlivé úseky.

Tabulka 5 Ukázka tabulky s naměřenými hodnotami

úseky taveb	1	2	3	4	5	6	.....	98	99	100	počty taveb	poč. rozměr hladina 10 (0, = 419)	odlitá hmotnost
1.úsek 0-59	0	0	0	0	3	0	.....	0	0	0	59	0,388833333	0
2.úsek 59-121	0	1	0	2	0	0	.....	0	0	2	62	0,391666667	2149
3.úsek 121-254	3	1	1	0	0	0	.....	0	1	0	133	0,403666667	4407
4.úsek 254-302	0	0	0	0	0	3	.....	0	0	0	48	0,402833333	9353
5.úsek 302-338	0	0	0	0	0	0	.....	0	0	2	36	0,435333333	11087
1. úsek 0-106	0	1	0	2	0	0	.....	0	0	2	106	0,433666667	3870
2.úsek 106-176	3	0	0	0	0	0	.....	0	0	0	70	0,460333333	6418
3.úsek 176-257	0	0	0	0	0	3	.....	1	0	0	81	0,4285	9318
1. úsek 0-165	0	1	0	2	3	0	.....	0	0	2	165	0,4405	6061
2.úsek 165-298	3	1	1	0	0	0	.....	0	1	0	133	0,474	10702
1. úsek 0-125	3	1	1	0	0	0	.....	0	1	0	125	0,461666667	0
2.úsek 125-206	0	0	0	0	0	3	.....	1	0	0	81	0,3945	4468
3.úsek 206-305	0	1	0	3	0	0	.....	0	0	2	99	0,369	7330
1. úsek 0-42	0	2	0	3	0	0	.....	0	0	0	42	0,387833333	0
2.úsek 42-148	0	1	0	2	0	0	.....	0	0	2	106	0,5815	1502
3. úsek 148-299	3	0	0	0	0	3	.....	1	0	0	151	0,475166667	5257
4.úsek 299-362	0	1	0	3	0	0	.....	0	0	0	63	0,443666667	10784
kombinace taveb													
1+2 úsek 0-121	0	1	0	2	3	0	.....	0	0	2	121	0,388833333	0
1+2+3 úsek 0-254	3	2	1	2	3	0	.....	0	1	2	254	0,388833333	0
1+2+3+4 úsek 0-302	3	2	1	2	3	3	.....	0	1	2	302	0,388833333	0
1+2+3+4+5 úsek 0-338	3	2	1	2	3	3	.....	0	1	4	338	0,388833333	0
2+3 úsek 59-254	3	2	1	2	0	0	.....	0	1	2	195	0,391666667	2149 2+3 úsek 59-254
2+3+4 úsek 59-302	3	2	1	2	0	3	.....	0	1	2	243	0,391666667	2149 2+3+4 úsek 59-302
2+3+4+5 úsek 59-338	3	2	1	2	0	3	.....	0	1	4	279	0,391666667	2149 2+3+4+5 úsek 59-338
3+4 úsek 254-302	3	1	1	0	0	3	.....	0	1	0	181	0,403666667	4407 3+4 úsek 254-302
3+4+5 úsek 254-338	3	1	1	0	0	3	.....	0	1	2	217	0,403666667	4407 3+4+5 úsek 254-338
4+5 úsek 302-338	0	0	0	0	0	3	.....	0	0	2	84	0,402833333	9353 4+5 úsek 302-338
1+2 úsek 0-176	3	1	0	2	0	0	.....	0	0	2	176	0,433666667	3870 1+2 úsek 0-176
1+2+3 úsek 0-257	3	1	0	2	0	3	.....	1	0	2	257	0,433666667	3870 1+2+3 úsek 0-257
2+3 úsek 106-257	3	0	0	0	0	3	.....	1	0	0	151	0,460333333	6418 2+3 úsek 106-257
1+2 úsek 0-298	3	2	1	2	3	0	.....	0	1	2	298	0,4405	6061 1+2 úsek 0-298
1+2. úsek 0-206	3	1	1	0	0	3	.....	1	1	0	206	0,461666667	0 1+2. úsek 0-206
1+2+3.úsek 0-305	3	2	1	3	0	3	.....	1	1	2	305	0,461666667	0 1+2+3.úsek 0-305
2+3.úsek 125-305	0	1	0	3	0	3	.....	1	0	2	180	0,3945	4468 2+3.úsek 125-305
1+2. úsek 0-148	0	3	0	5	0	0	.....	0	0	2	148	0,387833333	0 1+2. úsek 0-148
1+2+3.úsek 0-299	3	3	0	5	0	3	.....	1	0	2	299	0,387833333	0 1+2+3.úsek 0-299
1+2+3+4 úsek 0-362	3	4	0	8	0	3	.....	1	0	2	362	0,387833333	0 1+2+3+4 úsek 0-362
2+3.úsek 42-299	3	1	0	2	0	3	.....	1	0	2	257	0,5815	1502 2+3.úsek 42-299
2+3+4. úsek 42-362	3	2	0	5	0	3	.....	1	0	2	320	0,5815	1502 2+3+4. úsek 42-362
3+4úsek 148-362	3	1	0	3	0	3	.....	1	0	0	214	0,475166667	5257 3+4úsek 148-362

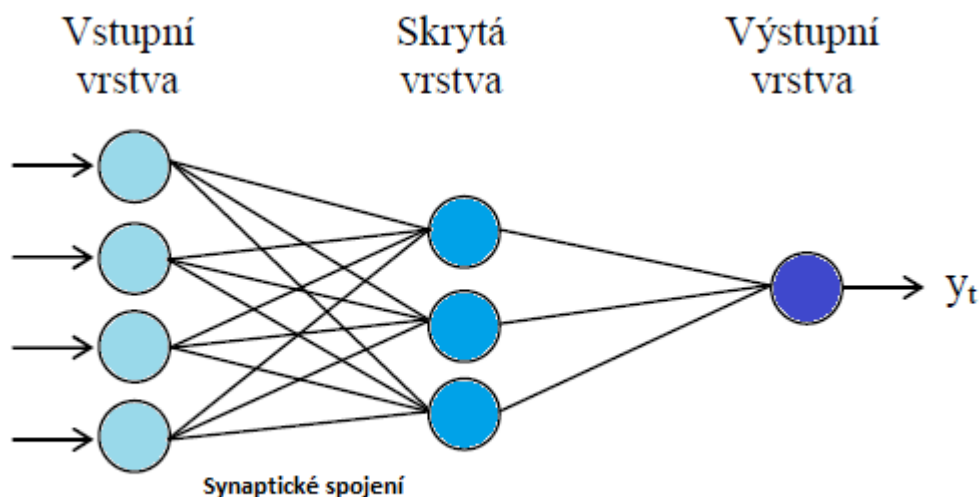
### 6.2.2 Výsledky učení modelu

Jak již bylo, výše naznačeno, model tvoří 18 umělých neuronových sítí. Výstupním parametrem každé neuronové sítě je střední průměr profilu krystalizátoru na jednotlivé měřicí úrovni po výšce krystalizátoru. Schematické znázornění struktury modelu je vyobrazeno na obrázku 16.



Obr. 16 Schematické znázornění struktury modelu krystalizátoru

Pro řešení v softwarovém systému STATISTICA bylo použito vícevrstvé perceptronové síť. Grafické znázornění neuronových sítí je vyobrazeno na obrázku číslo 17. Vstupem pro tyto sítě byly četnosti resp. kumulativní četnosti jednotlivých odlévaných značek, odlitá hmotnost, jako parametr počátečních podmínek pro daný úsek řešení a počet odlitých taveb, jako kontrolní údaj při řešení. Výstupem, jak již bylo řečeno, byl parametr rozměru profilu krystalizátoru na dané hladině krystalizátoru.



Obr. 17 Topologie neuronových sítí

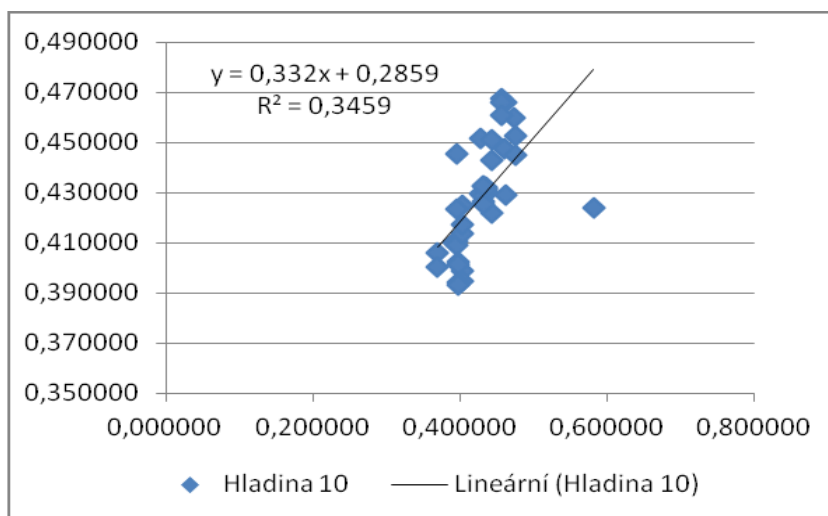
Z hlediska topologie jednotlivých neuronových sítí byla konstantní vstupní vrstva se 102 neurony a výstupní vrstva s jedním neuronem. Skrytá vrstva pak měla proměnlivý počet neuronů od 8 do 30 neuronů.

V následujících tabulkách 6 až 22 jsou výsledky učení jednotlivých neuronových sítí, tedy jednotlivé body pro dané úrovně výšky krystalizátoru. Tabulky jsou doplněny grafy hodnocení naučenosti jednotlivých neuronových sítí.



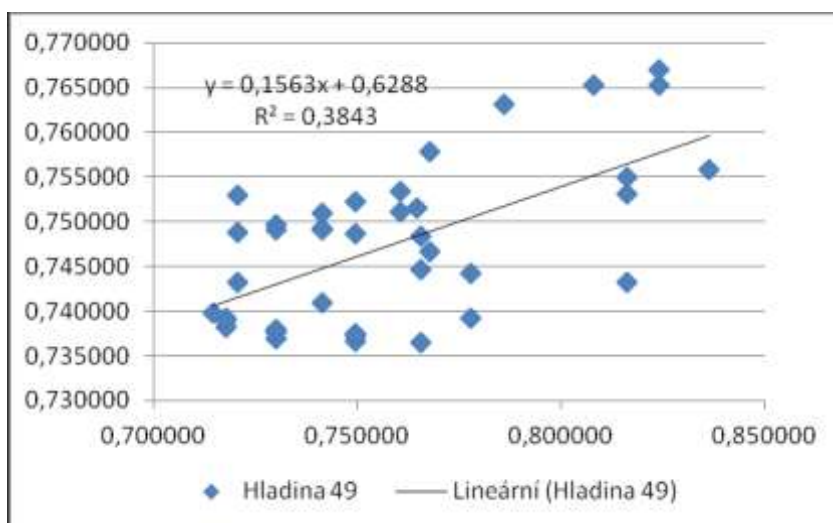
**Tabulka 6 Výsledky neuronové sítě na hladině 10**

10 (Výstup (cíl))	10 - Výstupní prom. (3. MLP (VVPS) 102-8-1)
0,391667	0,410035
0,403667	0,398626
0,402833	0,424969
0,435333	0,431257
0,430833	0,432699
0,460333	0,447746
0,428500	0,429716
0,394500	0,410430
0,474000	0,459880
0,461667	0,429227
0,394500	0,409003
0,369000	0,406097
0,455667	0,467491
0,581500	0,423829
0,475167	0,445074
0,443667	0,421987
0,398167	0,402285
0,403667	0,394798
0,402833	0,413689
0,435333	0,429870
0,430833	0,426309
0,402833	0,417058
0,435333	0,432092
0,430833	0,428691
0,435333	0,431688
0,430833	0,425328
0,430833	0,432563
0,428500	0,451612
0,394500	0,445499
0,394500	0,423199
0,461667	0,465994
0,369000	0,400433
0,455667	0,466216
0,455667	0,460961
0,475167	0,452454
0,443667	0,450864
0,398167	0,401322
0,443667	0,442753
0,398167	0,394176
0,398167	0,393233



**Tabulka 7 Výsledky neuronové sítě na hladině 49**

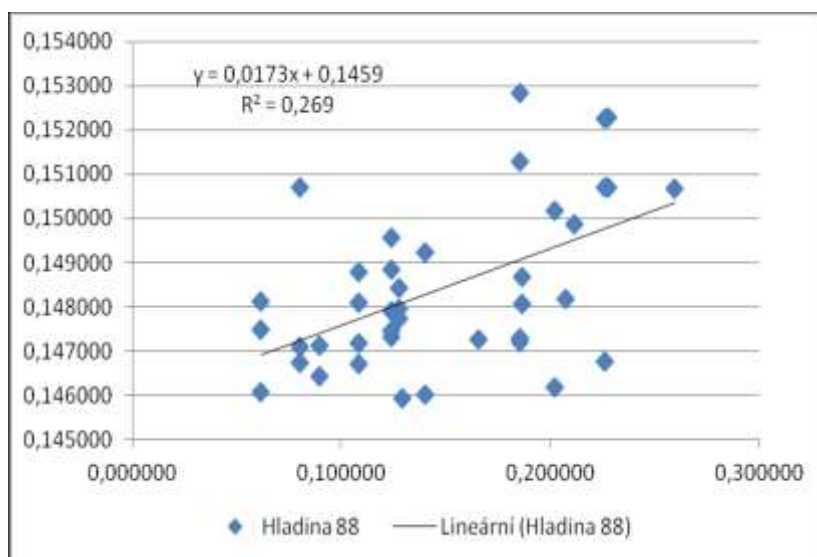
49 (Výstup (cíl))	49 - Výstupní prom. (2. MLP (VVPS) 102-8-1)
0,764833	0,751537
0,760667	0,753355
0,718000	0,739267
0,730333	0,749666
0,749667	0,752307
0,808167	0,765275
0,768000	0,746653
0,720667	0,748867
0,786167	0,763205
0,777833	0,739175
0,714667	0,739729
0,730333	0,749048
0,765833	0,748413
0,836500	0,755898
0,824333	0,765358
0,816333	0,743258
0,741500	0,749307
0,760667	0,751084
0,718000	0,738152
0,730333	0,736994



0,749667	0,736669
0,718000	0,738946
0,730333	0,737604
0,749667	0,737232
0,730333	0,737899
0,749667	0,737505
0,749667	0,748634
0,768000	0,757856
0,720667	0,753005
0,720667	0,743228
0,777833	0,744161
0,730333	0,737968
0,765833	0,736467
0,765833	0,744659
0,824333	0,766948
0,816333	0,755030
0,741500	0,750939
0,816333	0,753101
0,741500	0,749095
0,741500	0,740873

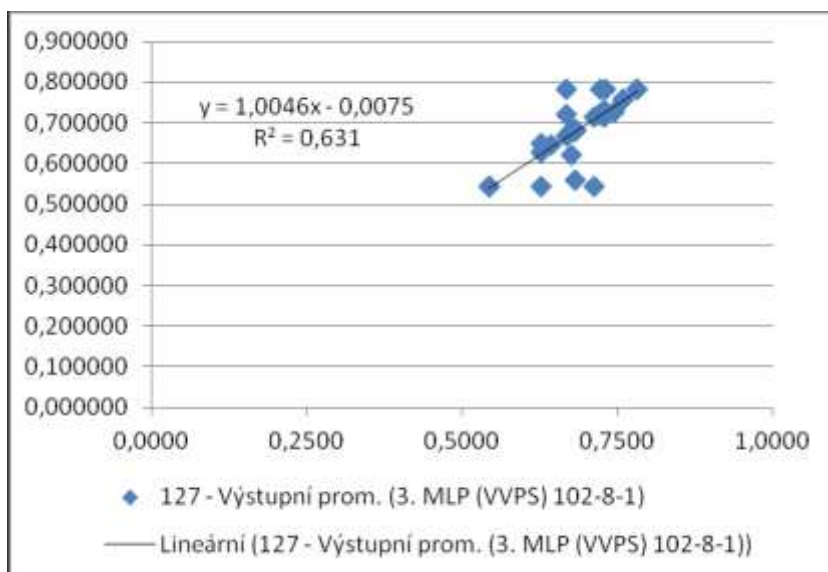
**Tabulka 8 Výsledky neuronové sítě na hladině 88**

88 (Výstup (cil))	88 - Výstupní prom. (2. MLP (VVPS) 102-8-1)
0,165667	0,147277
0,186667	0,148076
0,061667	0,146080
0,108500	0,147173
0,124167	0,147326
0,259667	0,150676
0,202333	0,146194
0,080500	0,147087
0,211500	0,149865
0,140167	0,146029
0,129167	0,145946
0,089500	0,147127
0,127500	0,147955
0,207333	0,148182
0,227833	0,150692
0,226167	0,146755
0,185667	0,147202
0,186667	0,148676
0,061667	0,148134
0,108500	0,148786
0,124167	0,149555
0,061667	0,147484
0,108500	0,148095
0,124167	0,148859
0,108500	0,146702
0,124167	0,147445
0,124167	0,147908
0,202333	0,150163
0,080500	0,150697
0,080500	0,146744
0,140167	0,149237
0,089500	0,146446
0,127500	0,147734
0,127500	0,148434
0,227833	0,152280
0,226167	0,152258
0,185667	0,152839
0,226167	0,150717
0,185667	0,151279
0,185667	0,147286



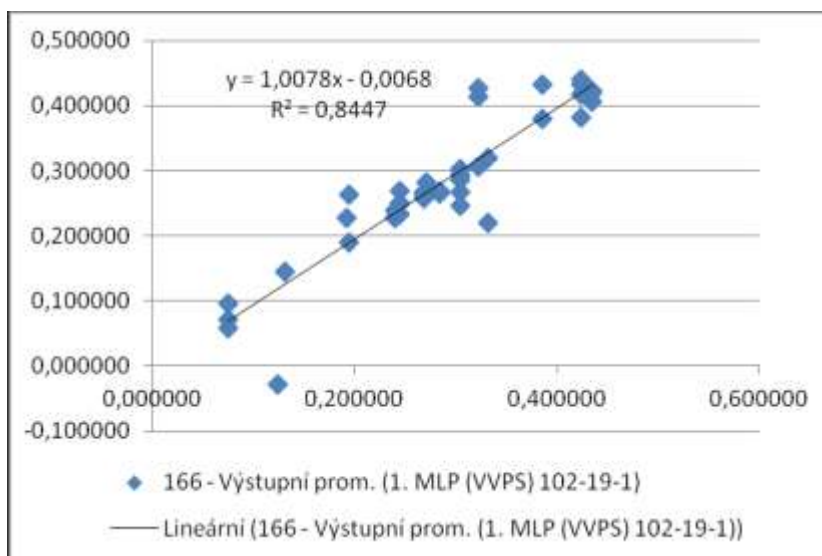
Tabulka 9 Výsledky neuronové sítě na hladině 127

127 (Výstup (cíl))	127 - Výstupní prom. (3. MLP (VVPS) 102-8-1)
0,6447	0,644669
0,7820	0,782000
0,5440	0,544000
0,6827	0,682667
0,6765	0,676501
0,7462	0,727634
0,7227	0,781851
0,6690	0,669001
0,7202	0,720169
0,7130	0,713000
0,6285	0,544000
0,6278	0,649023
0,6823	0,682335
0,7310	0,782000
0,7283	0,728334
0,7588	0,758832
0,7285	0,712796
0,7820	0,782000
0,5440	0,544000
0,6827	0,679528
0,6765	0,679528
0,5440	0,544000
0,6827	0,679528
0,6765	0,679528
0,6827	0,558399
0,6765	0,679528
0,6765	0,619581
0,7227	0,722667
0,6690	0,781997
0,6690	0,719826
0,7130	0,544000
0,6278	0,627833
0,6823	0,679528
0,6823	0,682331
0,7283	0,728333
0,7588	0,758835
0,7285	0,728500
0,7588	0,758832
0,7285	0,728500
0,7285	0,728500



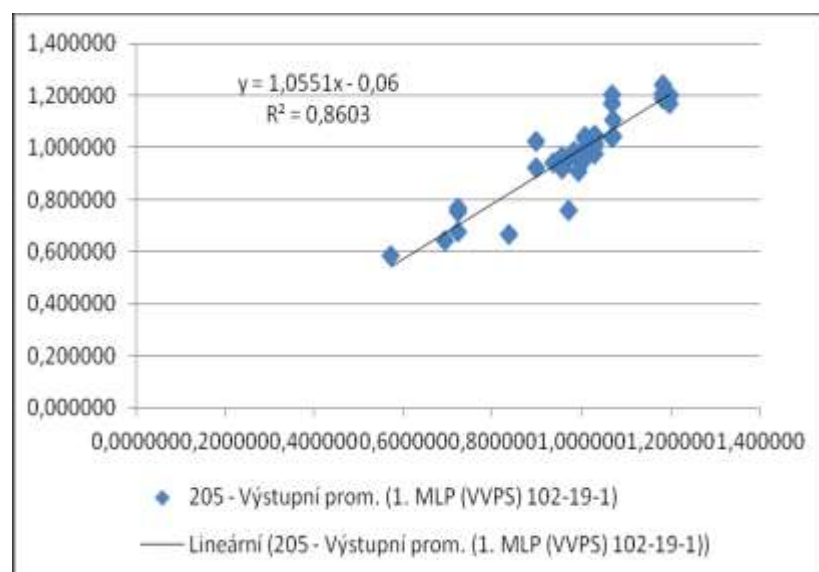
**Tabulka 10 Výsledky neuronové sítě na hladině 166**

166 (Výstup (cíl))	166 - Výstupní prom. (1. MLP (VVPS) 102-19-1)
0,131500	0,144641
0,332333	0,320179
0,074333	0,096133
0,245167	0,269662
0,304000	0,301915
0,304000	0,266897
0,386000	0,432641
0,322500	0,306946
0,270333	0,282188
0,284000	0,264703
0,124167	-0,027370
0,194333	0,263450
0,268000	0,262691
0,191500	0,227419
0,239333	0,227680
0,434667	0,423681
0,423667	0,382687
0,332333	0,220050
0,074333	0,059183
0,245167	0,249345
0,304000	0,293125
0,074333	0,071704
0,245167	0,232625
0,304000	0,285208
0,245167	0,250208
0,304000	0,293094
0,304000	0,246165
0,386000	0,379857
0,322500	0,412998
0,322500	0,426969
0,284000	0,268836
0,194333	0,189197
0,268000	0,266609
0,268000	0,258364
0,239333	0,238825
0,434667	0,420237
0,423667	0,432355
0,434667	0,405332
0,423667	0,417357
0,423667	0,439457



**Tabulka 11 Výsledky neuronové sítě na hladině 205**

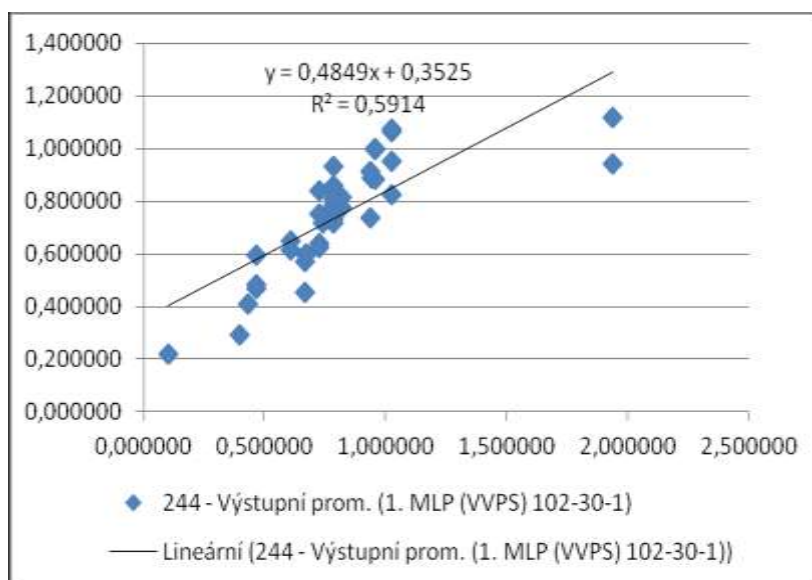
205 (Výstup (cíl))	205 - Výstupní prom. (1. MLP (VVPS) 102-19-1)
0,572000	0,582703
0,970167	0,954150
0,722000	0,754342
1,008167	1,034208
1,029500	1,050538
0,956000	0,926836
1,070333	1,106512
1,068000	1,038857
0,936167	0,939652
0,993500	0,954161
0,692833	0,642363
0,897333	1,022255
0,983333	0,973959
0,837500	0,667400
0,956833	0,920193
1,198000	1,204122
1,183000	1,240316
0,970167	0,756494
0,722000	0,677039
1,008167	0,993771



1,029500	1,018135
0,722000	0,769822
1,008167	1,043671
1,029500	1,040891
1,008167	0,955589
1,029500	0,976499
1,029500	1,005018
1,070333	1,041856
1,068000	1,170374
1,068000	1,204684
0,993500	0,907328
0,897333	0,924318
0,983333	0,975499
0,983333	0,985823
0,956833	0,967057
1,198000	1,197587
1,183000	1,207944
1,198000	1,169895
1,183000	1,186808
1,183000	1,188808

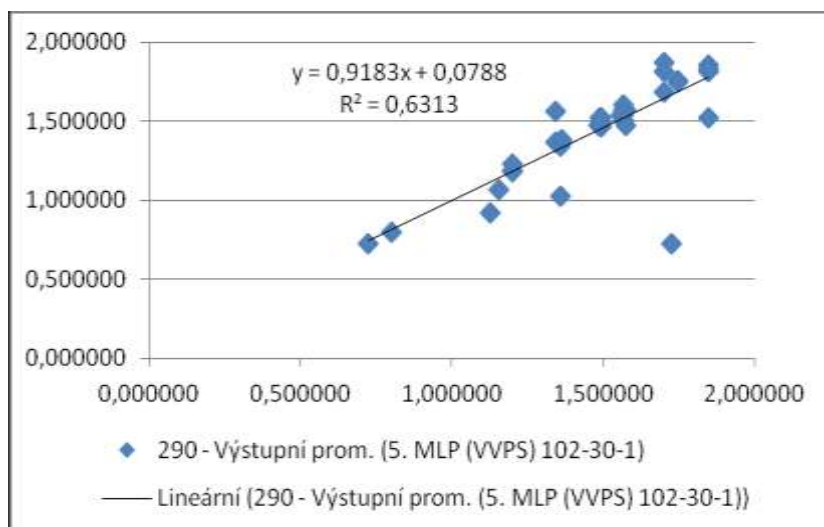
**Tabulka 12 Výsledky neuronové sítě na hladině 244**

244 (Výstup (cif))	244 - Výstupní prom. (1. MLP (VVPS) 102-30-1)
0,101667	0,218978
0,668000	0,569594
0,466667	0,469959
0,725333	0,839663
0,783500	0,858504
0,738333	0,717770
0,934167	0,735030
0,939000	0,886061
0,782667	0,785434
0,818333	0,776384
0,429500	0,411877
0,607833	0,649975
0,785000	0,746450
0,395833	0,294171
0,673167	0,602502
0,957833	0,882983
1,023667	0,823781
0,668000	0,455949
0,466667	0,483370
0,725333	0,639736
0,783500	0,730537
0,466667	0,597016
0,725333	0,753382
0,783500	0,844182
0,725333	0,626325
0,783500	0,717125
0,783500	0,930463
0,934167	0,912372
1,939000	1,116840
1,939000	0,939497
0,818333	0,812855
0,607833	0,616345
0,785000	0,777973
0,785000	0,811602
0,673167	0,595544
0,957833	0,994614
1,023667	1,065441
0,957833	1,001572
1,023667	1,072399
1,023667	0,953810



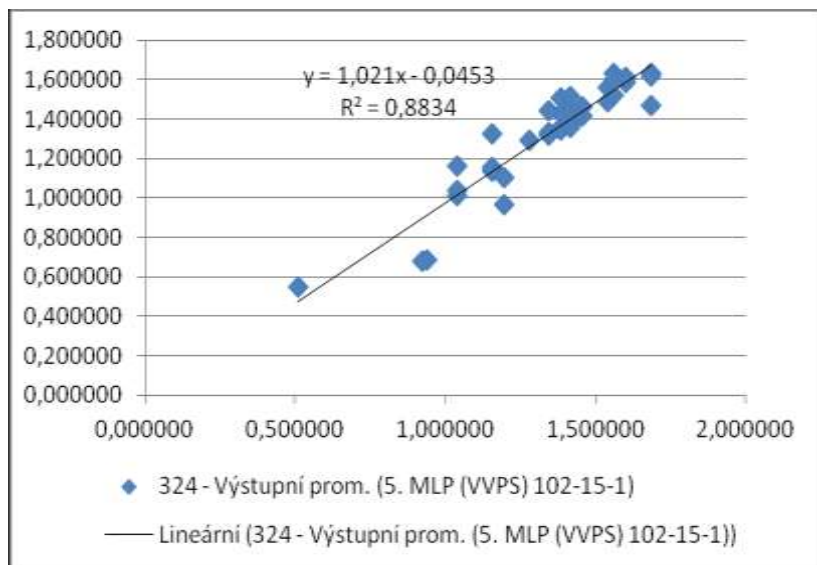
Tabulka 13 Výsledky neuronové sítě na hladině 290

290 (Výstup (cíl))	290 - Výstupní prom. (5. MLP (VVPS) 102-30-1)
0,800333	0,795093
1,362000	1,345314
1,201333	1,190676
1,494667	1,486693
1,567833	1,570038
1,486333	1,476902
1,726167	0,728209
1,701333	1,685835
1,559500	1,535158
1,574000	1,571884
1,128000	0,922222
1,343167	1,559632
1,491333	1,492320
1,158333	1,066609
1,363500	1,365920
1,746333	1,754611
1,846833	1,524882
1,362000	1,029495
1,201333	1,179910
1,494667	1,519423
1,567833	1,599920
1,201333	1,229126
1,494667	1,488474
1,567833	1,537152
1,494667	1,463469
1,567833	1,552727
1,567833	1,504859
0,726167	0,726845
1,701333	1,867535
1,701333	1,811124
1,574000	1,469655
1,343167	1,366940
1,491333	1,473383
1,491333	1,518914
1,363500	1,382621
1,746333	1,750580
1,846833	1,812602
1,746333	1,749844
1,846833	1,851159
1,846833	1,831173



Tabulka 14 Výsledky neuronové sítě na hladině 324

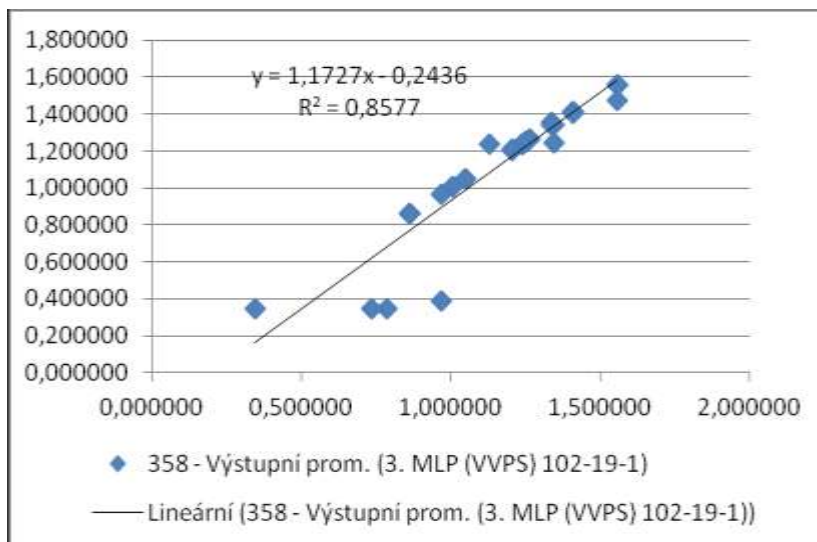
324 (Výstup (cíl))	324 - Výstupní prom. (5. MLP (VVPS) 102-15-1)
0,507833	0,547319
1,195000	1,102265
1,039333	1,009886
1,381500	1,506981
1,414500	1,407629
1,278333	1,291033
1,538167	1,486545
1,560333	1,517062
1,408000	1,432460
1,454833	1,412688
0,938000	0,685539
1,152500	1,322248
1,344333	1,334056
0,920833	0,677097
1,152833	1,132492
1,598500	1,583650
1,683833	1,470526
1,195000	0,964103
1,039333	1,035316



1,381500	1,357438
1,414500	1,373168
1,039333	1,164161
1,381500	1,431755
1,414500	1,444327
1,381500	1,342105
1,414500	1,358455
1,414500	1,516101
1,538167	1,557966
1,560333	1,632476
1,560333	1,601776
1,454833	1,463585
1,152500	1,153459
1,344333	1,317632
1,344333	1,441135
1,152833	1,150844
1,598500	1,609525
1,683833	1,633477
1,598500	1,606293
1,683833	1,631263
1,683833	1,615693

Tabulka 15 Výsledky neuronové sítě na hladině 358

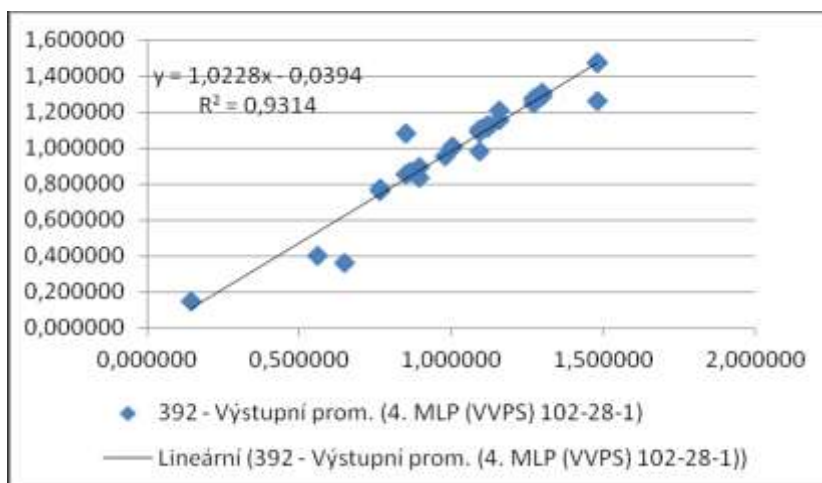
358 (Výstup (cíl))	358 - Výstupní prom. (3. MLP (VVPS) 102-19-1)
0,346000	0,346001
1,051667	1,051560
0,864000	0,863911
1,239833	1,239778
1,254167	1,254148
1,131000	1,239465
1,339500	1,355829
1,411167	1,411148
1,264500	1,264800
1,344500	1,344510
0,789500	0,348173
0,968167	0,386983
1,207333	1,209365
0,738167	0,346079
1,008167	1,008144
1,408167	1,409359
1,556167	1,476937
1,051667	1,047529
0,864000	0,864087
1,239833	1,239869
1,254167	1,254453
0,864000	0,863916
1,239833	1,239344
1,254167	1,254067
1,239833	1,237975
1,254167	1,253983
1,254167	1,248886
1,339500	1,339337
1,411167	1,408629
1,411167	1,410065
1,344500	1,243447
0,968167	0,968248
1,207333	1,207313
1,207333	1,205210
1,008167	1,008123
1,408167	1,408393
1,556167	1,555796
1,408167	1,406900
1,556167	1,555769
1,556167	1,555822





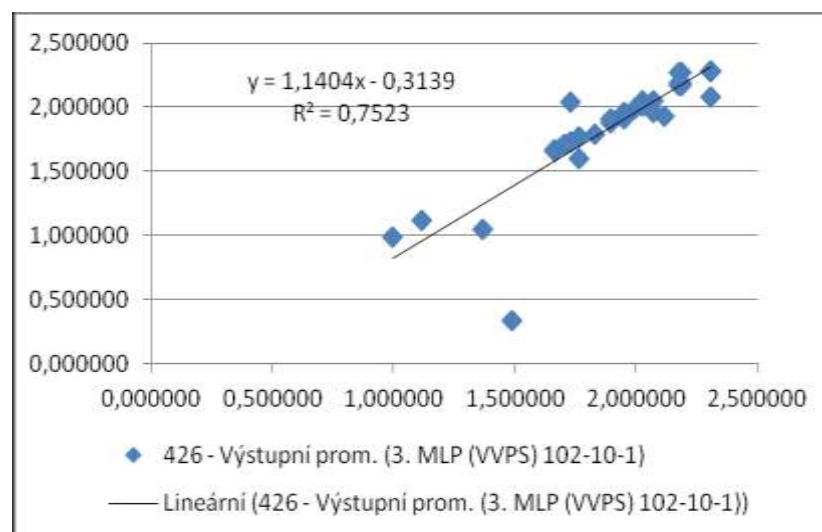
Tabulka 16 Výsledky neuronové sítě na hladině 392

392 (Výstup cíl))	392 - Výstupní prom. (4. MLP (VVPS) 102- 28-1)
0,145667	0,147178
0,897333	0,896888
0,766000	0,775096
1,122000	1,117930
1,094000	1,087239
0,978833	0,956257
1,271833	1,247625
1,297167	1,299034
1,110333	1,113270
1,159500	1,153956
0,649833	0,357649
0,849333	1,080371
1,004833	1,009878
0,559500	0,399860
0,868500	0,864460
1,277000	1,281483
1,478500	1,260532
0,897333	0,831360
0,766000	0,765770
1,122000	1,113968
1,094000	1,101659
0,766000	0,762215
1,122000	1,119034
1,094000	1,098226
1,122000	1,129510
1,094000	1,096529
1,094000	0,980351
1,271833	1,275048
1,297167	1,288645
1,297167	1,305113
1,159500	1,209838
0,849333	0,852141
1,004833	1,002666
1,004833	1,004790
0,868500	0,865458
1,277000	1,275864
1,478500	1,477299
1,277000	1,277246
1,478500	1,475567
1,478500	1,477043



Tabulka 17 Výsledky neuronové sítě na hladině 426

426 (Výstup cíl))	426 - Výstupní prom. (3. MLP (VVPS) 102- 10-1)
0,996000	0,984786
1,765333	1,765232
1,661500	1,660163
2,025000	2,034341
1,951000	1,963860
1,829500	1,790831
2,113833	1,926569
2,177333	2,172741
1,997500	1,987421
2,070667	2,053671
1,485500	0,331314
1,729000	2,040757
1,893000	1,899883
1,367167	1,045868
1,705667	1,704999
2,187333	2,271285
2,309333	2,081817
1,765333	1,598375
1,661500	1,664924

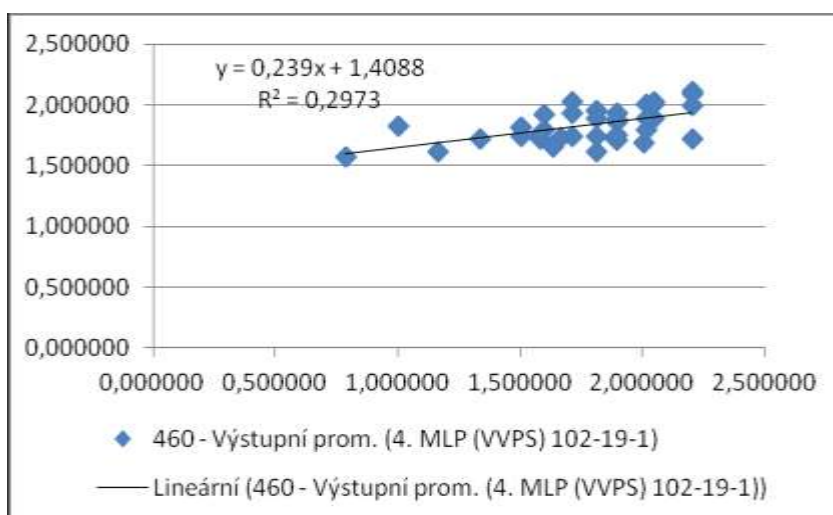




2,025000	2,050444
1,951000	1,952274
1,661500	1,663176
2,025000	2,021811
1,951000	1,938764
2,025000	2,014658
1,951000	1,953737
1,951000	1,908110
1,113833	1,118145
2,177333	2,193105
2,177333	2,273986
2,070667	1,954863
1,729000	1,724306
1,893000	1,878432
1,893000	1,906030
1,705667	1,708863
2,187333	2,192370
2,309333	2,280086
2,187333	2,173776
2,309333	2,277923
2,309333	2,284029

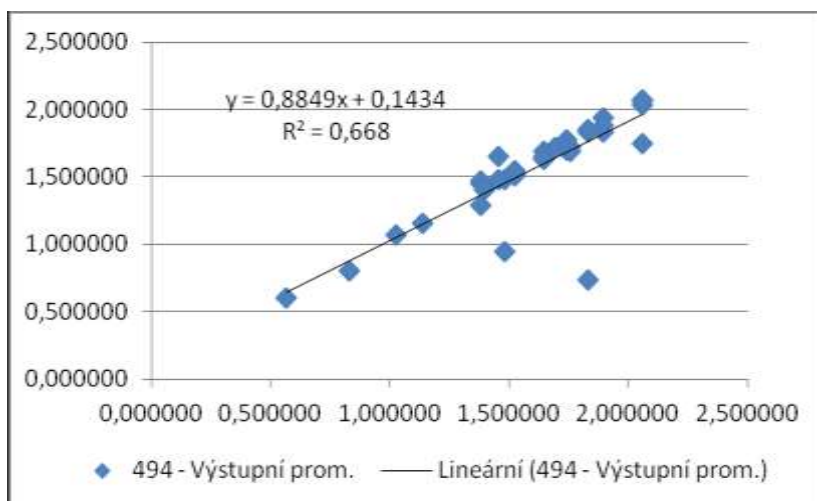
Tabulka 18 Výsledky neuronové sítě na hladině 460

460 (Výstup cil))	460 - Výstupní prom. (4. MLP (VVPS) 102-19-1)
0,788000	1,574228
1,634333	1,657999
1,505000	1,743112
1,896167	1,713739
1,813667	1,610756
1,664333	1,725958
2,005167	1,690691
2,018167	1,794815
1,886667	1,734886
1,894167	1,750676
1,336833	1,724776
1,596167	1,789127
1,712333	1,738951
1,164333	1,615170
1,584333	1,723017
2,046000	1,890356
2,202667	1,716827
1,634333	1,660844
1,505000	1,820474
1,896167	1,930390
1,813667	1,949812
1,505000	1,817952
1,896167	1,928176
1,813667	1,947796
1,896167	1,862724
1,813667	1,884829
1,813667	1,740262
1,005167	1,830348
2,018167	2,004799
2,018167	1,891568
1,894167	1,883178
1,596167	1,916698
1,712333	2,030657
1,712333	1,928137
1,584333	1,764761
2,046000	2,031201
2,202667	2,111206
2,046000	2,002751
2,202667	2,088105
2,202667	1,993996



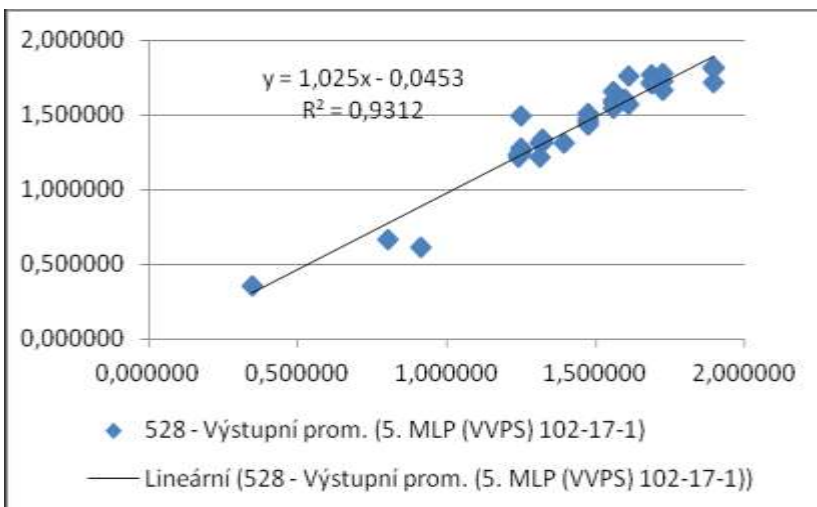
**Tabulka 19 Výsledky neuronové sítě na hladině 494**

494 (Výstup (cíl))	494 - Výstupní prom. (4.MLP (VVPS))
0,568500	0,606654
1,483500	1,477969
1,379500	1,452001
1,742500	1,780319
1,647833	1,631648
1,524833	1,519672
1,832333	0,739578
1,895000	1,832863
1,691167	1,716888
1,758333	1,715423
1,135500	1,153548
1,455500	1,655422
1,524500	1,528869
1,024667	1,072202
1,398000	1,407745
1,833500	1,830334
2,056333	1,747864
1,483500	0,943022
1,379500	1,292991
1,742500	1,754906
1,647833	1,685638
1,379500	1,466576
1,742500	1,709484
1,647833	1,653886
1,742500	1,695193
1,647833	1,643545
1,647833	1,633294
0,832333	0,807504
1,895000	1,940443
1,895000	1,885068
1,758333	1,688328
1,455500	1,477901
1,524500	1,506469
1,524500	1,545322
1,398000	1,422635
1,833500	1,840393
2,056333	2,035109
1,833500	1,855325
2,056333	2,074315
2,056333	2,059765



**Tabulka 20 Výsledky neuronové sítě na hladině 528**

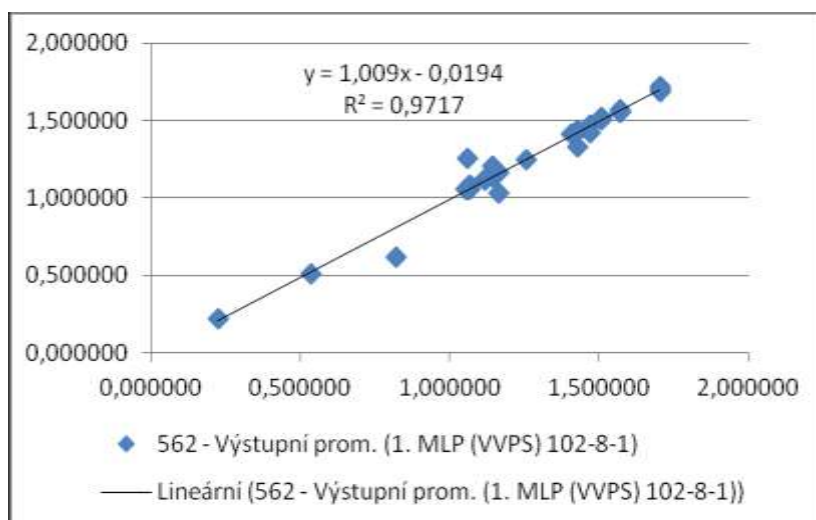
528 (Výstup (cíl))	528 - Výstupní prom. (5. MLP (VVPS) 102-17-1)
0,347333	0,351611
1,310833	1,315982
1,250667	1,277848
1,560333	1,656957
1,472167	1,448636
1,391167	1,315625
1,610000	1,763109
1,722500	1,666765
1,577333	1,608651
1,597833	1,608999
0,912167	0,616613
1,250667	1,488924
1,322833	1,341403
0,804833	0,663949
1,239500	1,217709
1,685667	1,765033
1,894833	1,716636
1,310833	1,213783
1,250667	1,245065



1,560333	1,592111
1,472167	1,512096
1,250667	1,256446
1,560333	1,582348
1,472167	1,459655
1,560333	1,541015
1,472167	1,429561
1,472167	1,475279
1,610000	1,574267
1,722500	1,722182
1,722500	1,774634
1,597833	1,600303
1,250667	1,271815
1,322833	1,310471
1,322833	1,333019
1,239500	1,234881
1,685667	1,716174
1,894833	1,817105
1,685667	1,709128
1,894833	1,814508
1,894833	1,808233

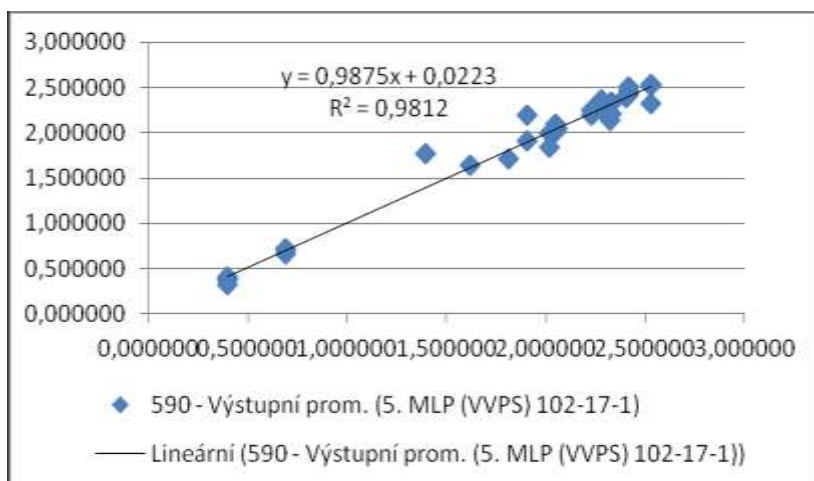
**Tabulka 21 Výsledky neuronové sítě na hladině 562**

562 (Výstup (cíl))	562 - Výstupní prom. (1. MLP (VVPS) 102- 8-1)
0,225667	0,224204
1,163667	1,166970
1,070833	1,082181
1,430833	1,431506
1,145833	1,140501
1,258667	1,245994
1,428667	1,425697
1,573333	1,567573
1,410333	1,417245
1,470500	1,472527
0,823667	0,621847
1,060000	1,254491
1,056667	1,055635
0,536667	0,508352
1,117667	1,112739
1,509167	1,521641
1,705333	1,685522
1,163667	1,034196
1,070833	1,055890
1,430833	1,434070
1,145833	1,152855
1,070833	1,077800
1,430833	1,430550
1,145833	1,140175
1,430833	1,327068
1,145833	1,142213
1,145833	1,204113
1,428667	1,425918
1,573333	1,557146
1,573333	1,553892
1,470500	1,424039
1,060000	1,056762
1,056667	1,060101
1,056667	1,055334
1,117667	1,119177
1,509167	1,505343
1,705333	1,697532
1,509167	1,515662
1,705333	1,716396
1,705333	1,699158



Tabulka 22 Výsledky neuronové sítě na hladině 590

590 (Výstup (cil))	590 - Výstupní prom. (5. MLP (VVPS) 102- 17-1)
1,621167	1,637128
2,018667	1,996443
2,050167	2,017473
2,327833	2,336826
0,399833	0,388232
2,321833	2,135384
2,227667	2,200037
2,417333	2,425089
2,297500	2,291896
2,279500	2,272295
1,811500	1,706070
1,902500	2,190455
0,694000	0,704975
1,396500	1,770568
2,052000	2,038251
2,405000	2,403570
2,528667	2,317987
2,018667	1,839395
2,050167	2,044128
2,327833	2,336153
0,399833	0,382379
2,050167	2,095665
2,327833	2,318993
0,399833	0,412510
2,327833	2,203702
0,399833	0,399318
0,399833	0,326091
2,227667	2,251304
2,417333	2,504681
2,417333	2,461949
2,279500	2,365990
1,902500	1,911271
0,694000	0,671399
0,694000	0,714731
2,052000	2,051094
2,405000	2,396311
2,528667	2,539140
2,405000	2,391737
2,528667	2,520160
2,528667	2,524095



### 6.2.3 Zhodnocení modelu

Při tvorbě modelu byly využity informace z Výrobního informačního systému (VIS), ve kterém jsou uloženy všechny údaje o odlitých tavných na zvoleném zařízení plynulého odlévání s možností vyhledání informací k vybraným krystalizátorům, které byly vybrány pro tvorbu modelu. Na vybraných krystalizátorech, tak jako v případě analytického modelu, musely proběhnout průměrně 4 měření systémem MKL 100/420 a průměrné množství odlité oceli bylo 12000 tun.

Pro řešení v softwarovém systému STATISTICA byly použity vícevrstvé perceptronové sítě. Vstupem pro tyto sítě byly četnosti resp. kumulativní četnosti jednotlivých odlévaných značek, odlitá hmotnost, jako parametr počátečních podmínek pro daný úsek řešení a počet odlitých taveb, jako kontrolní údaj při řešení. Výstupem byl parametr rozměru profilu krystalizátoru na dané hladině krystalizátoru.

Z hlediska topologie jednotlivých neuronových sítí byla konstantní vstupní vrstva se 102 neurony a výstupní vrstva s jedním neuronem. Skrytá vrstva pak měla proměnlivý počet neuronů od 8 do 30 neuronů.

Model tvoří 18 umělých neuronových sítí. Výstupním parametrem každé neuronové sítě je střední průměr profilu krystalizátoru na jednotlivé měřicí úrovni po výšce krystalizátoru.

U dokončeného modelu a jeho nasazení v praxi, by mělo jít pomoci nasimulování u odlití určitého druhu značek, jak bude krystalizátor vypadat a jestli může dojít k nadměrnému opotřebení krystalizátoru. Tyto modelování nejsou příliš vhodná pro počáteční hladiny krystalizátorů, kdy koeficient lineární regrese  $R^2$  vykazuje nízké hodnoty. S dalšími hladinami ovšem koeficient lineární regrese významně roste a pro oblast dolní konicity, což byla hlavní oblast zájmu této diplomové práce, je tato hodnota velmi dobrá. Dalším důvodem nižších hodnot spolehlivosti u počátečních hladin je relativně málo hodnot, konkrétně 40. Pro větší přesnost by bylo potřeba provést rozšíření počtu prvků trénovací množiny.

## 7 Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření modelu pro hodnocení životnosti technického objektu, konkrétně krystalizátoru. V rámci řešení byly vytvořeny dva modely. První model je založen na analytickém přístupu transformace dominantního degradačního mechanismu na tvar pravděpodobnosti mezní poruchy s uplatněním Weibullova rozdělení. Výsledný analytický model je pak vytvořen spojením střední závislosti pravděpodobnosti mezní poruchy při předpokladu Weibullova rozdělení pravděpodobnosti s parametry stanovenými v závislosti na dominantním degradačním mechanismu a regresním modelem diagnostického parametru, v daném případě průměrné dolní konicity.

Druhý model využívající umělé neuronové sítě je založený na závislosti četnosti jednotlivých značek odlitých ocelí a průměrné hodnoty profilu krystalizátoru na jednotlivých měřených hladinách systémem MKL 100/420. Výsledkem řešení je model krystalizátoru, který umožňuje vykreslení průměrného profilu krystalizátoru po celé délce tohoto objektu po odlití zadaného množství oceli a specifikaci četnosti jednotlivých značek ocelí. Model byl řešen pomocí neuronových sítí, které byly vytvořené v programu STATISTICA.

Pracovalo se s kruhovými průměry, které byly provozně změřeny systémem MKL 100/420. Měření prováděla firma Dasfos v.o.s. ve Třineckých železárnách a.s. Tento systém měřil krystalizátor v 18 hladinách a v každé z nich s třístupňovým intervalem po obvodu krystalizátoru. Pro měření byly využity průměrné hodnoty na jednotlivých hladinách. Se změnou hmotnosti taveb se měnila průměrná hodnota na jednotlivých bodech. Tato skutečnost byla dána do souvislosti s počtem odlévaných značek a průměrná hodnota byla změněna.

Ze získaných výsledků jednotlivých neuronových sítí vyplývá, že v počátečních hladinách krystalizátoru, kde míra opotřebení je minimální, chyba modelu způsobuje nízké hodnoty koeficientu lineární regrese, dle kterého jsou jednotlivé části modelu hodnoceny. S dalšími hladinami ovšem koeficient lineární regrese významně roste a pro oblast dolní konicity, což byla hlavní oblast zájmu této diplomové práce, je cca 80 %.

Význam modelu spočívá v možnosti plánování jednotlivých sekvencí a kampaní s definováním značek a jejich četnosti v závislosti na profilu krystalizátoru s následnou možností stanovení parametrů krystalizátorů např. průměrnou dolní konicitu, kterou považujeme za diagnostický parametr pro tento typ krystalizátorů.

U dokončeného modelu a jeho nasazení v praxi, by mělo jít pomocí nasimulování u odlití určitého druhu značek, jak bude krystalizátor vypadat a jestli může dojít k nadměrnému opotřebení krystalizátoru.

## 8 Literatura a web odkazy

- [1] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *Weibullova analýza*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [2] CROWDER, MJ., KINDER, AC., SMITH, RL., et al. *Statistical Analysis of Reliability Data*. místo neznámé : Chapman&Hall, 1994.
- [3] DASFOS. <http://www.dasfos.com>. *Dasfos*. [Online] 2009. [Citace: 17. březen 2012.] <http://www.dasfos.com/?clanek=3>.
- [4] MAIXNER L., KOLNÍKOVÁ Z. *Spolehlivost automatizovaných výrobních systémů*. Praha : SNTL, 1984.
- [5] ŠTĚTINA, J. <http://otp.fme.vutbr.cz>. *Energetický ústav Odbor termomechaniky a techniky prostředí*. [Online] Ing. Josef ŠTĚTINA, 2007. [Citace: 18. březen 2012.] <http://otp.fme.vutbr.cz/users/stetina/disertace/kapitola-1.htm>.
- [6] WEIBULL. <http://www.weibull.com/>. *weibull.com*. [Online] Reliability Engeneering Resources, 1992-2012. [Citace: 21. Duben 2012.]
- [7] ŽELEZÁRNY, TŘINECKÉ. Třinecké železářny. *trz.cz*. [Online] Třinecké železářny, 2005. [Citace: 18. březen 2012.] <http://www.trz.cz/vyrd/3B7D05B3DA9A0B0CC125703C00411193>.
- [8] NOGA, R. <http://web.tuke.sk/hf-kmzaz/webplynuleodlievanie/pages/08krystalizator.html>. *Stránky plynulého odlievania*. [Online] richieboy, 2009. [Citace: 30. duben 2012.]
- [9] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, FMMI. *Ověření predikce množství odlité oceli krystalizátorem*. Ostrava : VŠB, 2008. VŠB-TU-638-046-08.
- [10] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, FMMI. *Stanovení zbytkové životnosti krystalizátoru*. Ostrava : VŠB, 2006. VŠB-TU-638-039-06.
- [11] V.O.S., DASFOS. Technická zpráva k řešení konstrukce krystalizátoru 300x350 mm ZPO1 v Třineckých železárnách a.s. Ostrava : Dasfos Ostrava, 2007. Sv. Dílčí zpráva č.3 projektu TTÚ, 089/4500244916.

- [12] ELEKTROREVUE. <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02017/index.html>. [Online] Ústav telekomunikací FEKT., 4. březen 2002. [Citace: 2. květen 2012.] <http://www.elektrorevue.cz/>. ISSN 1213-1539.
- [13] MĚŘENÍ, FEDERÁLNÍ ÚŘAD PRO NORMALIZACI A. *MEDZINÁRODNÝ ELEKTROTECHNICKÝ SLOVNÍK*. Bratislava : Československý inštitút technickej normalizácie a akosti, 1993.
- [14] GRANT, E. - LEAVENWORTH, R. *Statistical quality control*. místo neznámé : McGraw-Hill, 1996. ISBN 0-07-844354-7.
- [15] STATSOFT. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com). *Statistica*. [Online] Statsoft, 2012. [Citace: 15. duben 2012.] [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).
- [16] Metal 2011. <http://www.metal2011.com/data/metal2011/sbornik/index.htm>. [Online] TANGER, spol. s r.o, 1992-2011. [Citace: 3. květen 2012.] <http://www.metal2011.com>.